



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité

Document public

DEM'Eaux Thau- Rapport d'analyses géochimiques- Apports des campagnes mensuelles et de l'inversac 2020-2021 - Livrable L5b

Rapport final

BRGM/RP-71957-FR

Janvier 2023



PROJET COFINANCÉ PAR LE FONDS EUROPÉEN DE DÉVELOPPEMENT RÉGIONAL



Géosciences pour une Terre durable

brgm



DEM'Eaux Thau- Rapport d'analyses géochimiques- Apports des campagnes mensuelles et de l'inversac 2020-2021 - Livvable L5b Rapport final

BRGM/RP-71957-FR
Janvier 2023

Étude réalisée dans le cadre du projet
BRGM RP16LRO005 avec le soutien financier de la Région Occitanie-Pyrénées-Méditerranée, de
l'Agence de l'eau RMC, de l'Europe, de l'Etat, de la Métropole de Montpellier Méditerranée, de la
commune de Balaruc-les-Bains et du SMBT.

Ranchoux C., Ladouche B., de Montety V, C. Batiot-Guilhe, Pétré M. A.,
M. Hery, A. Desoeuvre, Seidel J.L.

Vérificateur :

Nom : A dactylographier

Fonction : XX à compléter

Date :

Signature :

Approbateur :

Nom : A dactylographier

Fonction XX à compléter :

Date :

Signature :



PROJET COFINANCÉ PAR LE FONDS EUROPÉEN DE DÉVELOPPEMENT RÉGIONAL

Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : qualite@brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots-clés : Hydrosystème de Thau, Eaux thermales, Karst, Traceurs hydrochimiques, Géochimie, Datation, Processus d'altération, Inversac, Balaruc-les-Bains, Hérault

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Ranchoux C., Ladouche B., de Montety V, C. Batiot-Guilhe, Pétré M. A., M. Hery, A. Desoeuvre, Seidel J.L. (2023) – DEM'Eaux Thau- Rapport d'analyses géochimiques- Apports des campagnes mensuelles et de l'inversac 2020-2021 - Livrable L5b.Rapport final. BRGM/RP-71957-FR, 174p., 54 fig., 24 tabl., 4 ann.

Synthèse

Le projet de recherche DEM'Eaux Thau, débuté en 2017 et piloté par le BRGM, vise à mieux comprendre la structure et le fonctionnement de l'hydrosystème du Bassin de Thau (Hérault) afin de développer un outil de gestion des eaux souterraines. Ce travail pluridisciplinaire a été divisé en trois volets : (1) le volet géologie, piloté par Géosciences Montpellier et réalisé en collaboration avec le BRGM, (2) le volet hydrogéologie, piloté par le BRGM et réalisé en collaboration avec HydroSciences Montpellier et Synapse et (3) le volet géochimie piloté par HydroSciences Montpellier et réalisé en collaboration avec le BRGM.

L'essentiel des résultats obtenus dans le volet géochimie sont présentés dans le livrable L5 du projet subdiviser en deux parties. **Le présent rapport constitue le livrable L5b du projet et présente les résultats des prélèvements de 2020-2021 et leurs interprétations.** Il fait suite au livrable L5a qui a permis de présenter de manière détaillée les principales méthodes chimiques et isotopiques mise en œuvre dans le projet ainsi que les résultats des prélèvements de 2018-2019 et leur interprétation.

Les nouvelles données sont exposées en trois parties. La première partie (chapitre 3) se concentre sur les campagnes mensuelles de 2020, caractérisant les variations mensuelles des différents outils afin de mieux comprendre l'évolution temporelle du système. La deuxième partie (chapitre 4) présente les résultats obtenus durant l'inversac (2020-2022) afin de mieux caractériser ce phénomène. Enfin, la troisième partie (chapitre 5) présente les résultats des nouveaux forages réalisés durant le projet DEM'Eaux Thau (plateforme expérimentale) permettant d'affiner nos connaissances en profondeur du système. Les interprétations sont ensuite résumées en chapitre 6 afin de réviser le schéma conceptuel du bassin de Thau. Au préalable, ce présent document présentera succinctement un point de méthode (Chapitre 2) complémentaire au point de méthode détaillée dans le rapport L5a (BRGM/RP-71281-FR).

Sommaire

1. Introduction	15
2. Méthodes	17
2.1. POINTS DE PRELEVEMENTS	17
2.1.1. Campagne mensuelle	17
2.1.2. Echantillonnage de l'inversac	18
2.1.3. Prélèvements des forages de la plateforme scientifique expérimentale ..	18
2.1.4. Prélèvements de la Vise	20
2.2. ANALYSES EFFECTUEES	20
2.2.1. Campagne mensuelle	20
2.2.2. Echantillonnage de l'inversac	22
3. Résultats des campagnes mensuelles (2020)	23
3.1. PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES ET PARAMETRES CHIMIQUES	23
3.1.1. Généralités	23
3.1.2. Evolution de la salinité	24
3.1.3. Interactions eaux roches	28
3.1.4. Evolution temporelle des principaux éléments majeurs	28
3.2. TRACEURS DES CONTAMINATIONS DE SURFACE-FLUX DE SURFACE ..	29
3.2.1. Bactériologie et nitrates	29
3.2.2. Caractérisation des composés organiques dans les eaux des campagnes spatiales (2018-2019)	30
3.3. APPORT DES OUTILS ISOTOPIQUES	34
3.3.1. Isotopes du Strontium	34
3.3.2. Isotopes du Lithium	35
3.3.3. Isotopes du Bore	38
3.4. DATATIONS	41
3.4.1. Gaz anthropiques	41
3.4.2. Hélium	44
4. Résultats de l'inversac (2020-2021)	47
4.1. PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES ET PARAMETRES CHIMIQUES	47
4.1.1. Evolution des profils de conductivité électrique mesuré en continu	47

4.1.2. Diagramme de Piper : description des facies chimiques	48
4.1.3. Evidence de mélange avec les eaux marines	48
4.1.4. Evolutions des paramètres physico-chimiques et chimiques et estimation des proportions de mélange	50
4.2. TRACEURS DES CONTAMINATIONS DE SURFACE-FLUX DE SURFACE (BACTERIOLOGIE ET NITRATES)	55
4.3. EVOLUTION DES SIGNATURES ISOTOPIQUES DURANT L'INVERSAC	57
4.3.1. Isotopes du Strontium	57
4.3.2. Isotopes du Lithium.....	62
4.3.3. Isotopes du Bore.....	63
4.4. DATATION.....	66
4.4.1. Gaz dissous (Ar, Ne, He)	66
4.4.2. Gaz anthropiques	66
5. Résultats de la plateforme expérimentale (DEMT1-DEMT2-DEMT3 et DEMT4) et de la Vise	71
5.1. CARACTERISATIONS GEOCHIMIQUES DES OUVRAGES DEMT1, DEMT2 ET LA VISE AVANT L'INVERSAC	72
5.1.1. Paramètres physico-chimiques et paramètres chimiques.....	72
5.1.2. Evolution de la salinité	73
5.1.3. Traceurs des contaminations de surface-flux de surface	75
5.1.4. Apport des outils isotopiques, traceurs des processus d'altération et des mélanges	76
5.1.5. Datation	79
5.2. CARACTERISATIONS GEOCHIMIQUES DES OUVRAGES DEMT1, DEMT3 ET DEMT4 PENDANT L'INVERSAC	83
5.2.1. Paramètres physico-chimiques et paramètres chimiques.....	83
5.2.2. Traceurs des contaminations de surface-flux de surface	88
5.2.3. Evolution des signatures isotopiques durant l'inversac	89
5.2.4. Datation	97
6. Synthèse et implications des nouveaux résultats	103
6.1. SYNTHÈSE ET DISCUSSION DES NOUVEAUTES APPORTEES PAR LES FORAGES DEMT1, DEMT2, DEMT3 ET DEMT4	103
6.2. REVISION DU SCHEMA CONCEPTUEL DU SECTEUR D'ETUDE EN SITUATION « NORMALE »	106

6.3. REVISION DU SCHEMA CONCEPTUEL DU SECTEUR D'ETUDE EN CONTEXTE D'INVERSAC	115
7. Bibliographie	119

Liste des figures

Figure 1: Localisation des points de prélèvement des campagnes mensuelles	17
Figure 2: Localisation des points de prélèvement pendant l'inversac.....	18
Figure 3 : Représentation schématique de l'implantation des ouvrages réalisés et aquifères-cibles de la plateforme DEM'Eaux Thau.....	19
Figure 4: Digramme de Piper des campagnes 2018-2020. Les figurés vides correspondent aux campagnes spatiales (2018-2019) et les figurés pleins aux campagnes mensuelles (2020).....	23
Figure 5: Digramme binaire des (a) concentrations en Na en fonction des concentrations en Cl et (b) compositions en isotopes stable de l'eau ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$) des campagnes de 2018 à 2020.	25
Figure 6: Proportions d'eau de mer (moyenne, minimum et maximum en %) estimé par les concentrations en Cl, Na, K (en gris) et les isotopes stables de l'eau $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{D}$ (en noir) pour Ambressac, Cauvy, CGE-Tennis, la Vise, F6 et la Vise d'une part (a) et F5 et S12 école (b) d'autre part. Les données spatiales sont représentées par les cercles vides, et les nouvelles données mensuelles en cercles pleins. Le numéro d'index correspond au nombre d'échantillon par période. Seul les échantillons de la Vise non impactés par les eaux de la lagune (voir texte partie 2.1.4) ont été utilisée ici.....	26
Figure 7 : Niveau piézométrique ou débit moyen journalier de la Vise, du forage F6 et des sources Cauvy et Ambressac, associés à la proportion d'eau thermique estimée pour chacun des prélèvements (points rouges).	27
Figure 8: Evolution des concentrations en coliformes totaux et fécaux, des concentratons en NO_3 et des niveaux piézométriques de Ambressac, Cauvy S12 Ecole et F6 pendant les campagnes mensuelles de 2020.	30
Figure 9: Identification des composés organiques fluorescents pour les échantillons de la source karstique de la Vène et de deux forages thermaux (F14 et F5), en mars 2018	31
Figure 10: Evolution de l'intensité de fluorescence totale et du COT pour les campagnes de Mars et Aout 2018.....	32
Figure 11: Proportions des composés organiques de types humiques et de types protéiques et teneurs en COT pour les campagnes de Mars et Aout 2018	33
Figure 12: Rapport isotopique $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en fonction de l'inverse de la concentration en Sr des échantillons de 2018-2020. Les barres d'erreurs sont de 0,00003 pour le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et de 5 % pour les concentrations en Sr. Les figurés vides correspondent aux données spatiales (2018-2019) et les figurés pleins aux campagnes mensuelles avant l'inversac (2020).....	34
Figure 13: $\delta^7\text{Li}$ en fonction de l'inverse de la concentration en Li des échantillons de 2018 (figurés vides) et de 2020 (figurés pleins). Les proportions de mélange ont été estimées pour un mélange à trois pôles (thermal, karstique et marin). Les barres d'erreurs sont de 0,5 ‰ pour le $\delta^7\text{Li}$ et 5 % pour les concentrations en B.	37
Figure 14: Diagramme des concentrations en B ($\mu\text{g/L}$) en fonction des concentrations en Cl (mg/L) (en haut) et zoom sur les eaux karstiques (en bas). Les figurés pleins sont ceux des nouvelles campagnes mensuelles, les figurés vide ceux des camapgnes spatiales (2018-2019). La droite représente la droite de dilution de l'eau de mer.....	38
Figure 15: Diagramme du $\delta^{11}\text{B}$ en fonction de la concentration en B (en haut) et de l'inverse de la concentration du bore (en bas). Les figurés pleins sont ceux des nouvelles campagnes mensuelles, les figurés vide ceux des camapgnes spatiales (2018-2019). Sur ces figures les courbes noires représentent un mélange entre l'eau de mer et CGE Tennis bas, les courbes grises un mélange entre l'eau de mer et CGE	

Tennis haut, les courbes en gris pointillées un mélange entre CGE Tennis bas et l'eau de pluie et la courbe rouge un mélange entre les eaux thermales et CGE Tennis haut. L'impact théorique des processus d'adsorption et de désorption y est aussi représenté.	40
Figure 16: Représentation graphique des résultats de SF6, CFC-11, CFC-12 et CFC-113 des eaux étudiées entre 2018 et 2020. Les figurés vides correspondent aux données spatiales (2018-2019) et les figurés pleins aux campagnes mensuelles avant l'inversac (2020).	42
Figure 17: Représentation graphique des résultats du CFC-11 en fonction du CFC-113 de F5, S12, Cauvy, Ambressac et CGE Tennis entre 2018 et 2021. Les figurés vides correspondent aux données spatiales (2018-2019) et les figurés pleins aux campagnes mensuelles avant l'inversac (2020). Une barre d'erreur de 15 % a été appliquée correspondant à 3°C de variation dans la conversion des résultats en pptv.	43
Figure 18: Age hélium des eaux thermales de F5 et S12 et F6 (à gauche) et age hélium et en fonction de la proportion d'eau récente estimée par les concentrations en CFC (à droite) pour des porosités efficaces du réservoir karstique de 0,5%. Les eaux thermales sont considérés comme circulant dans le réservoir Jurassique, F6 dans le Miocène.	45
Figure 19: Age hélium estimé pour les eaux karstiques en considérant une porosité efficace du réservoir karstique de 1 %	46
Figure 20: Evolution temporelle de la conductivité électrique montrant l'impact de l'inversac sur la presqu'île de Balaruc.	47
Figure 21: Diagramme de Piper des eaux échantillonnées pendant l'inversac.	48
Figure 22: Digramme binaire des (a) concentrations en Na en fonction des concentrations en Cl et (b) compositions en isotopes stables de l'eau ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$) des campagnes de 2018 à 2021. Les figurés vides correspondent aux données en conditions « normales » (2018-2020) et les figurés pleins aux campagnes réalisées pendant l'inversac (2020-2021).	49
Figure 23: Données des concentrations en Ca et HCO_3 en fonction du Cl des eaux étudiées (2018-2021). Les figurés vides correspondent aux campagnes spatiales et mensuelles i.e. en conditions normal (2018-2020) et les figurés pleins aux campagnes liées à l'inversac (2020-2021). Les droites représente les évolutions des différents points de prélèvement entre les conditions normal et durant l'inversac.	50
Figure 24: Evolutions des concentrations en Ca en fonction du Cl des eaux de S12 (2018-2021). Les figurés vides correspondent aux campagnes spatiales et mensuelles i.e. en conditions normales (2018-2020) et les figurés pleins aux campagnes liées à l'inversac (2020-2021).	51
Figure 25: proposition d'interprétation des données géochimiques de F5 et S12. Ainsi en condition normale, F5 et S12 sont principalement alimentés par les eaux thermales (flèches rouges), et à faible proportion d'eau karstique de type Cauvy (flèches bleues). Cinq jours après le début de l'inversac, les eaux de F5 se rapproche du pôle marin, probablement lié aux eaux de la lagune (flèche verte), alors que S12 se rapproche d'abord des signatures karstiques. Cette eau provient probablement du trop plein karstique qui ne peut pas sortir par la Vise. Puis plus la durée de l'inversac est grande plus les eaux de F5 et S12 se rapproche d'un pôle marin, caractérisé par les eaux de la lagune. Les eaux atypiques de la campagne de juin 2021, prélevées après une période de recharge, peut s'expliquer par une réorganisation des flux, avec une augmentation de proportion d'eau thermique en S12 et une signature des eaux en F5 proche des caractéristiques de F6, DMT1 et DMT3 impactés par l'inversac.	52

Figure 26 : Evolution des proportions d'eau de la Lagune de Thau pour Cauvy et Ambressac par rapport à leur valeur mesurée juste avant l'inversac. Pour Cauvy, les proportions de mélange ont aussi été estimées par rapport à la valeur de S12 le plus impacté par l'inversac (voir le texte pour plus d'informations).....	54
Figure 27: Evolution des concentrations en coliformes totaux et fécaux, des concentratons en NO3 et des niveaux piézométriques de Ambressac, Cauvy S12 Ecole et F6 pendant l'inversac.	56
Figure 28: Rapport isotopique $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en fonction de l'inverse de la concentration en Sr en période d'inversac de tous les échantillons (a) et un zoom sur les points thermaux (b). L'astérisque permet de pointer les échantillons particuliers de juin 2021. Les figurés vides correspondent aux données en conditions « normales » (2018-2020) et les figurés pleins aux campagnes réalisées pendant l'inversac (2020-2021).....	58
Figure 29: représentation des proportions d'eau de la lagune, estimé avec les isotopes du strontium en janvier 2021	59
Figure 30: Schéma d'interprétation des circulations des eaux d'après la Figure 25 complétée avec les nouvelles interprétations apportées par les isotopes du strontium.....	60
Figure 31: Evolution des signatures en Li du forage F6 (A.F.I. signifie Après la Fin de l'Inversac)62	
Figure 32: Evolution des concentrations et du $\delta^{11}\text{B}$ des eaux thermales (F5, F9 et S12) et des eaux de la lagune en période d'inversac.	64
Figure 33: Evolution des concentrations (en haut) et du $\delta^{11}\text{B}$ (en bas) des eaux de F4 et F6 (à gauche) et des eaux karstiques Cauvy et Ambressac (à droite) en période d'inversac.	65
Figure 34: Teneurs en CFC en pptv en fonction des concentrations en Cl des eaux échantillonnées durant l'inversac. Un focus a été réalisé sur les évolutions des eaux thermales68	
Figure 35 : Teneurs en CFC en pptv en fonction des concentrations en Cl (mmol/l) des eaux échantillonnées durant l'inversac. Un focus a été réalisé sur les évolutions de Cauvy, des ouvrages de mélanges (F4 et F6) et des forages de la plateforme scientifique expérimentale.	69
Figure 36: Localisation des installations de la plateforme experimentale (équipement de la source de la Vise et implantations de 4 nouveaux forages).....	71
Figure 37: Données de la conductivité électrique spécifique de l'eau (25°C) en fonction du pH (a) et de la température (b) des eaux étudiées (2018-2020). Les figurés vides correspondent aux campagnes spatiales (2018-2019) et les figurés pleins aux campagnes mensuelles (2020). La droite en pointillée représente la droite de mélange entre des eaux karstiques et les eaux thermales	73
Figure 38 : Proportion d'eau thermique (en %) estimée par les concentrations en Cl des ouvrages DENT1 et DENT2, et en considérant comme pôle thermal la moyenne des concentrations en F9 sur la période 2018-2020	74
Figure 39: Proportions des composés organiques de types humiques et de types protéiques et teneurs en COT des ouvrages DENT1 et DENT2 et la Vise avant l'inversac ..	76
Figure 40: Diagramme du $\delta^{11}\text{B}$ en fonction de l'inverse de la concentration en B des forages DENT1 et DENT2. Les courbes rouges représentent des mélanges entre les eaux thermales les plus impactées par les processus d'adsorption et (1) une eau karstique type « CGE-Tennis haut » (trait plein) ou (2) avec les eaux de mer (trait en pointillé). Les courbes grises représentent les mélanges entre les eaux de mer et les eaux karstiques récentes. Enfin, la courbe noire représente un mélange entre les eaux thermales théoriques (30 % eau de mer – 70 % eau karstique de type « CGE-Tennis bas ») non impactées par les processus d'interaction eau-roche.	78
Figure 41: Age hélium des eaux de DENT1 et DENT2 pour une porosité de 0,5 et 1%. Les indices indiquent l'âge apparent estimé pour chaque échantillon.	81

- Figure 42: Evolution du rapport $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ en fonction des concentration en ^{36}Cl . Les différentes courbes théoriques d'évolution et de mélange du $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ vs ^{36}Cl sont représentées (voir BRGM/RP-71281-FR pour plus d'information). Pour le DEMENT4, le point « a » représente l'échantillon après 4 h de pompage et le point « b » après 24 h de pompage. 82
- Figure 43: Rapport Mg/Ca en fonction de $\delta^{18}\text{O}$ des eaux étudiées sur la période 2018-2021. Les figurés vides correspondent aux prélèvements des campagnes spatiales et mensuelles i.e. en condition « normale » (2018-2020) et les figurés pleins aux prélèvements des campagnes liés à l'inversac (2020-2021). Les courbes grises 1 et 2 représentent les courbes d'évolutions théoriques des mélanges à deux pôles (Pôle karstique : moyenne des valeurs de Cauvy sur la période 2018-2020 ; Pôle thermal : moyenne des valeurs de F9 sur la période 2018-2019 ; pôle marin : valeur moyenne de la lagune prélevée en 2021). La courbe de mélange 3 correspond à un mélange théorique entre le pôle karstique et un pôle réservoir impacté par l'inversac, caractérisé par les eaux de S12 en fin d'inversac. 83
- Figure 44 : Schéma de réflexion sur l'origine de la salinité dans les ouvrages F6, DEMENT1 et DEMENT3 prélevés au cours de l'inversac 2020-2022 sans considérer l'apport d'eau thermique. 86
- Figure 45: Proportion des composés organiques de types humiques et de types protéiques et teneurs en COT des forages de la plateforme scientifique expérimentale et de la lagune (à la Vise) durant l'inversac. 89
- Figure 46 : Rapport isotopique $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en fonction de l'inverse de la concentration en Sr en période d'inversac des forages DEMENT1 ap. (pendant l'inversac), DEMENT3 et DEMENT4. DEMENT2 et DEMENT1 av. (avant inversac) sont aussi représentés à titre comparatif. Les évolutions des signatures des eaux de DEMENT4 pendant l'essai de pompage peuvent être interprétées par un mélange à trois pôles DEMENT4 initial-lagune-pôle karstique ou par un mélange DEMENT4 initial-lagune-pôle thermal. 91
- Figure 47: Concentrations en lithium et chlorures des eaux des forages DEMENT1, DEMENT2, DEMENT3 et DEMENT4. L'origine de l'apport en lithium est présentée (A-D). 92
- Figure 48: Signature isotopique $\delta^7\text{Li}$ en fonction de l'inverse de la concentration en Li en période d'inversac des forages DEMENT3 et DEMENT4. DEMENT2 est aussi représenté à titre comparatif. 93
- Figure 49: Evolution des concentrations du B en fonction du Cl des eaux des forages de la plateforme scientifique expérimentale (en haut) et du $\delta^{11}\text{B}$ en fonction de l'inverse de teneur en bore (en bas). 96
- Figure 50: Activités ^{14}C (pcm) en fonction de la signature isotopique en ^{13}C ($\delta^{13}\text{C}_{\text{C1D}}$ en ‰) de DEMENT4 et des précédents résultats (BRGM/RP-71281-FR). Les signatures isotopiques en C du pôle CO_2 mantellique (Blavoux et al 1982) et de la matrice carbonatée sont représentées en rouge et jaune respectivement. 100
- Figure 51: Rapport isotopique $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en fonction de l'inverse de la concentration en Sr des eaux thermales F5, F9, F14 et S12. Les signatures en Sr de ces eaux peuvent être expliquées par un mélange à deux pôles marin-DEMENT4 théorique (courbe grise) ou par un mélange à trois pôles Marins-DEMENT4-karstique récent (courbes noires). Les proportions de mélange sont données dans le texte et en Tableau 24) 110
- Figure 52: Représentation graphique des différentes hypothèses et scénarios permettant de justifier la température des eaux thermales et d'estimer la profondeur du réservoir thermal. 112
- Figure 53: Schéma conceptuel de la presqu'île de Balaruc-les-bains en période « normale ». 113
- Figure 54: Schéma conceptuel de la presqu'île de Balaruc-les-bains en situation d'inversac. 117

Liste des tableaux

Tableau 1 : stratégie de prélèvements pour suivre l'évolution de l'inversac.....	18
Tableau 2: Présentation des essais de pompages et des prélèvements associés sur les forages de la plateforme scientifique expérimentale.	19
Tableau 3: Résultats physico-chimiques des points de prélèvement de la Vise et mise en exergue des prélèvements impactés par les eaux de la lagune.....	20
Tableau 4 : Liste des échantillons par campagne et des analyses réalisées (2020).....	20
Tableau 5: Liste des échantillons par campagne et des analyses réalisées (2020-2021).	22
Tableau 6 : Estimation des proportions d'eau thermales (en %) calculées avec les concentrations de Cl, des échantillons de 2018 à 2020. Le pôle thermal est ici représenté par la moyenne des concentration du forage F9	27
Tableau 7 : Récapitulatif des analyses réalisées en isotopie du lithium	36
Tableau 8: Proportion d'eau récente (2020 ou 1994) et ancienne, antérieur à 1940 des eaux thermales (F5 et S12).	44
Tableau 9: Paramètres utilisés et leurs incertitudes pour le calcul du taux de production d'hélium45	
Tableau 10: Proportion d'eau de la lagune de Thau dans les ouvrages F5, F9 et S12 par rapport à leur valeur moyenne en situation « normal ».....	51
Tableau 11: Proportion d'eau de la lagune dans les ouvrages F6 et F4. Les proportions de mélange ont aussi été estimées par rapport a la valeur de S12 la plus impactée par l'inversac. La valeur initiale des ouvrages est l'échantillon du 29/08/2018 correspondant à la seule période en basse eaux où ces deux ouvrages ont été prélevés au cours de la même campagne d'échantillonnage.	55
Tableau 12: Estimation et évolution des proportions de mélange à trois pôles (karstique, thermale et marin) estimées par les résultats des isotopes du strontium des eaux durant l'inversac.	61
Tableau 13: Estimation et évolution des proportions de mélange à trois pôles (karstique, thermale et marin) estimé par les résultats en lithium des eaux durant l'inversac.	62
Tableau 14: Estimation des températures de recharge des eaux prélevées lors de l'inversac (en considérant des proportions d'eau de la lagune dans l'échantillon estimée en partie 4.1.4, la température de la lagune le jour du prélèvement et les températures de recharge des eaux karstiques (15°C pour les eaux karstiques actuelles et 13 °C pour les eaux karstiques anciennes).	67
Tableau 15 : proportions de mélange à trois poles des eaux de la plateforme expérimentale... 77	
Tableau 16: Paramètres utilisés pour le calcul du taux de production d'hélium pour DMT1 et DMT2. Le choix des paramètres est discuté dans le rapport L5a (BRGM/RP-71281-FR).	80
Tableau 17: Estimation des apports d'eau marine de type lagune ou S12 dans une eau dont la concentration initiale est celle mesurée en F6 et DMT1 en mai 2020 (avant l'inversac), estimé via les concentrations en Cl.	85
Tableau 18: Estimation des proportions des eaux de mer dans le forage DMT4 estimé par les concentrations en Cl, Na et K, ainsi que l'apport d'eau marine (ici pôle lagune) ou thermale (pôle F9) lié au temps de pompage.	87
Tableau 19: Proportion d'eau à trois pôles des eaux de DMT3 dans le cas d'un mélange entre un pôle karstique récent (CGE tennis), un pôle thermal (F9) et un pôle marin de type lagune.	89
Tableau 20: Proportion d'eau à trois pôles des eaux de DMT4 dans le cas d'un mélange entre un pôle karstique profond (DMT4), un pôle karstique récent (CGE tennis) et un pôle	

marin de type lagune (hypothèse 1) ou un pôle karstique profond (DEMT4), un pôle thermal (F9) et un pôle marin de type lagune (hypothèse 2).....	90
Tableau 21 : Contribution relative des pôles de mélange (cf. Figure 48)	94
Tableau 22. Estimation des températures de recharge sur la base des proportions d'eau de la lagune, la température de la lagune et la température de recharge représentative des différentes masses d'eau des forages de la plateforme scientifique expérimentale.	98
Tableau 23. Valeurs en CFC des eaux échantillonnées dans les forages DEMT1, DEMT3 et DEMT4 pendant l'inversac	98
Tableau 24 : Proportion d'eau à trois pôles des eaux thermales.	109

Liste des annexes

Annexe 1 Analyse de la fluorescence naturelle par spectrofluorimétrie 3D	123
Annexe 2 Résultats des caractérisations multi-isotopiques des campagnes mensuelles (2020) et de l'inversac (2020-2021) des ouvrages suivis dans le projet DEM'Eaux Thau ..	125
Annexe 3 Compléments des résultats des campagnes mensuelles (2020)	145
Annexe 4 Compléments des résultats de l'inversac (2020-2021).....	163

1. Introduction

Les ressources en eau souterraine des calcaires karstiques du Pli Ouest de Montpellier présentent un intérêt majeur pour le territoire pour l'alimentation en eau potable, le développement économique (pêche, activité conchylicole, thermalisme...) et l'irrigation. Ces calcaires correspondent à une zone de convergence entre différentes masses d'eau souterraines (eaux karstiques froides des Causses d'Aumelas et de la Gardiole et eaux thermales chaudes et minéralisées) à l'origine de conflits d'usage, de dégradation de la qualité et de problèmes de quantité d'eau. En outre, cet aquifère karstique est confronté de temps en temps à des phénomènes temporaires d'intrusion d'eau saumâtre (appelé inversac) par l'intermédiaire de la source sous-marine de la Vise, située dans la lagune de Thau. Ces différents réservoirs sont en interaction les uns avec les autres selon des processus complexes dont les déterminants ne sont pas tous connus

Dans ce contexte, et dans le cadre de la stratégie régionale Occitanie, le développement d'une filière complète d'exploration, exploitation et gestion des réservoirs sol/sous-sol a été mis en avant. En particulier, le projet de recherche DEM'Eaux Thau, débuté en juillet 2017 d'une durée de 4 ans et prolongé d'un an, a pour objectif de mieux comprendre la structure et le fonctionnement d'un hydrosystème complexe dans le secteur du Bassin de Thau (Hérault) et de développer un outil de gestion des eaux souterraines à l'échelle régionale basé sur un modèle hydrogéologique 3D distribué (code Marthe). Ce projet scientifique pluridisciplinaire implique la caractérisation de la géologie, l'hydrogéologie et la géochimie de cet hydrosystème, sur un territoire soumis : i) à des enjeux économiques importants (croissance démographique, thermalisme, conchyliculture, pêche, tourisme) ; ii) à la fragilité de l'équilibre entre les différentes ressources en eaux souterraines (comme en témoignent les phénomènes d'intrusion d'eau marine) ; iii) à la complexité du comportement des différents réservoirs. Ce projet rassemble le BRGM (coordinateur du projet - responsable des tâches hydrogéologie, modélisation hydrogéologique), Géosciences Montpellier (responsable de la tâche géologie/construction du modèle géologique), HydroSciences Montpellier (responsable de la tâche géochimie), l'entreprise Synapse Informatique (responsable de l'élaboration de l'outil de gestion) et le SMBT, futur destinataire de l'outil de gestion des eaux souterraines de l'hydrosystème de Thau. Ce projet est financé par l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, l'Etat et la Région (CPER), l'Europe (FEDER), Montpellier Méditerranée Métropole, la ville de Balaruc-les-Bains, le SMBT ainsi que par les partenaires opérationnels.

Le présent livrable se concentre sur les caractérisations géochimiques qui sont menées dans le cadre du projet DEM'Eaux Thau. Il a pour objectif de répondre à un certain nombre de questionnements qui persistent sur cette zone d'étude dans le but d'améliorer le schéma conceptuel de structure et de fonctionnement de l'hydrosystème (voir rapport L1 BRGM/RP-BRGM/RP-68483-FR, Ladouche et al. 2019). Ainsi, les objectifs du volet géochimique sont :

- L'identification et la caractérisation des interactions eau-roche, de l'origine des différents fluides et des différentes lithologies dans lesquelles les eaux ont circulé,
- Une meilleure caractérisation et compréhension du système karstique avec une meilleure connaissance des flux d'eau et des zones d'alimentation (notamment déterminer la part de la recharge en provenance du causse d'Aumelas ou du massif de la Gardiole alimentant les eaux de la Vise et de la presqu'île de Balaruc-les-Bains), une estimation des temps de résidence des eaux de cette recharge karstique, des proportions de mélanges avec les eaux thermales (pour Cauvy et Ambressac) et avec les eaux salées (mer et/ou lagune), le suivi de potentielles

influences industrielles, et une meilleure connaissance du type de circulation (en matrice ou en conduit).

- Une meilleure caractérisation et compréhension du système thermal : meilleure estimation de la profondeur du réservoir thermal, du temps de résidence de ces eaux, des proportions de mélanges avec les eaux karstiques récentes et anciennes et la localisation de ces mélanges,

D'un point de vue opérationnel, les caractérisations géochimiques ont été menées à plusieurs échelles de temps et d'espace :

- Caractérisation spatiale grâce au suivi d'une vingtaine de points sur l'ensemble du système. Ces prélèvements ont eu lieu entre 2018 et 2019 en période de hautes eaux (Mars 2018 et Décembre 2019) et en période de basses eaux (Aout 2018 et Mai 2019) (livrable L5a).
- Caractérisation des évolutions temporelles sur les principaux exutoires d'eau souterraine sur la presqu'île de Balaruc-les-Bains (Vise, Cauvy, Ambressac, CGE-tennis, ancienne source Thermal S12, forage thermal F5 et forage F6) (livrable L5b). Ces prélèvements ont eu lieu entre janvier 2020 et novembre 2020.
- Caractérisations des évolutions géochimiques suite au phénomène d'inversac initié le 28/11/2020 et terminé le 14/03/22 (livrable L5b).
- Caractérisations géochimiques inédites sur les ouvrages profonds des plateformes expérimentales mises en œuvre dans le projet (Forage de Sète/Stade Michel ; DEMENT1, DEMENT2, DEMENT3 et DEMENT4 sur la presqu'île de Balaruc-les-Bains) (livrable L5a et b).

Le présent rapport constitue le livrable L5b du projet et présente les résultats des prélèvements de 2020-2022 et leur interprétation. Il fait suite au livrable L5a qui a permis de présenter de manière détaillée (1) les principales méthodes chimiques et isotopiques mises en œuvre dans le projet pour étudier cet hydrosystème complexe, (2) les sites de prélèvement ainsi que les méthodes d'échantillonnage et d'analyse ainsi que (3) les résultats et les interprétations des investigations spatiales réalisées entre 2018 et 2019 via le suivi d'une vingtaine de points sur l'ensemble du système.

Une synthèse des données sur l'hydrosystème de Thau est disponible dans le rapport BRGM/RP-68483-FR, ainsi qu'un focus sur la caractérisation géologique de ce territoire dans le rapport BRGM/RP-70789-FR.

2. Méthodes

Cette partie méthode présente succinctement les points de prélèvements choisis, leur localisation et les analyses effectuées. Les méthodes d'échantillonnage et analytiques ont été présentées en détail dans le livrable L5a (BRGM/RP-71281-FR) et ne sont pas abordées ici à l'exception de l'analyse de la fluorescence naturelle par spectrométrie 3D présenté en annexe 1, puisqu'il s'agit d'une nouveauté de ce présent livrable.

2.1. POINTS DE PRELEVEMENTS

2.1.1. Campagne mensuelle

Les campagnes mensuelles correspondent aux prélèvements de 7 points spécifiques, représentatifs des différentes masses d'eau (Figure 1). Ainsi les points de Cauvy, Ambressac et CGE-Tennis informent sur l'évolution temporelle de la recharge ainsi que sur l'évolution des mélanges d'eau provenant des deux impluviums possibles (Gardiole ou Aumelas). Les prélèvements de F5 et S12 Ecole informent sur l'évolution temporelle des caractéristiques des eaux thermales. Le forage F6 est un mélange d'eau douce provenant de l'amont hydrologique et d'eau thermique. Les prélèvements mensuels informent donc sur l'évolution des proportions de mélanges d'eau douce et d'eau thermales alimentant cette zone de la presqu'île de Balaruc-les-Bains. Enfin, le prélèvement à la Vise, exutoire principale du système, permet de mieux comprendre les schémas de circulations des eaux du système.

Un suivis mensuel d'un cycle hydrologique a été prévu dans le projet. La crise sanitaire due au COVID-19 a toutefois fortement impacté l'avancement de cette tâche en empêchant la réalisation des prélèvements mensuels de Mars, Avril et Mai 2020. L'ensemble des campagnes (dates et points de prélèvement) est présenté en Tableau 4.

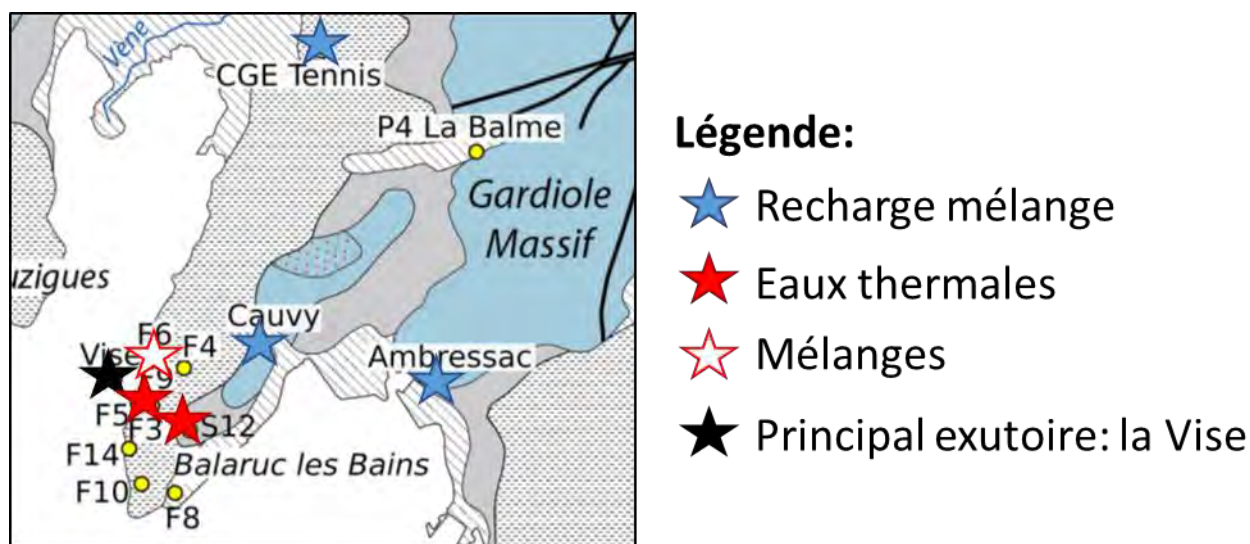


Figure 1: Localisation des points de prélèvement des campagnes mensuelles

2.1.2. Echantillonnage de l'inversac

L'occurrence d'un inversac à la source de la Vise le 28 novembre 2020 (Fin le 14 mars 2022) nous a conduit à effectuer un suivi resserré en décembre 2020 puis plus espacé à partir de Janvier 2021 (Tableau 1).

Tableau 1 : stratégie de prélèvements pour suivre l'évolution de l'inversac

Date	Nb de points	Objectifs
03-04-Dec 2020	8	Caractérisation spatiale de la phase transitoire
10-Dec 2020	5	Suivi de l'augmentation de la minéralisation
15-Dec 2020	5	Suivi de l'augmentation de la minéralisation
07-08-Janv2021	8	Caractérisation spatiale de la salinité en cours de stabilisation
11-Fev2021	5	Suivi de l'augmentation de la minéralisation
29-30 Juin2021	7	Caractérisation spatiale de la salinité à t0+ 7 mois
15-24 Nov. 2021	7	Caractérisation spatiale de la salinité à t0+ 12 mois Essai de pompage sur le nouveau forage DGMT4

Une campagne spatiale focalisée sur la presqu'île de Balaruc-les-Bains a été réalisée le plus rapidement possible (8 points le 3-4 décembre 2020) pour mieux caractériser la phase transitoire du phénomène d'inversac. Le suivi de l'augmentation de la salinité a ensuite été suivi sur un nombre plus restreint de points (Figure 2). Au total, 7 campagnes ont été réalisées de Décembre 2020 à Novembre 2021. L'ensemble des campagnes (dates et points de prélèvement) est présenté en Tableau 5.

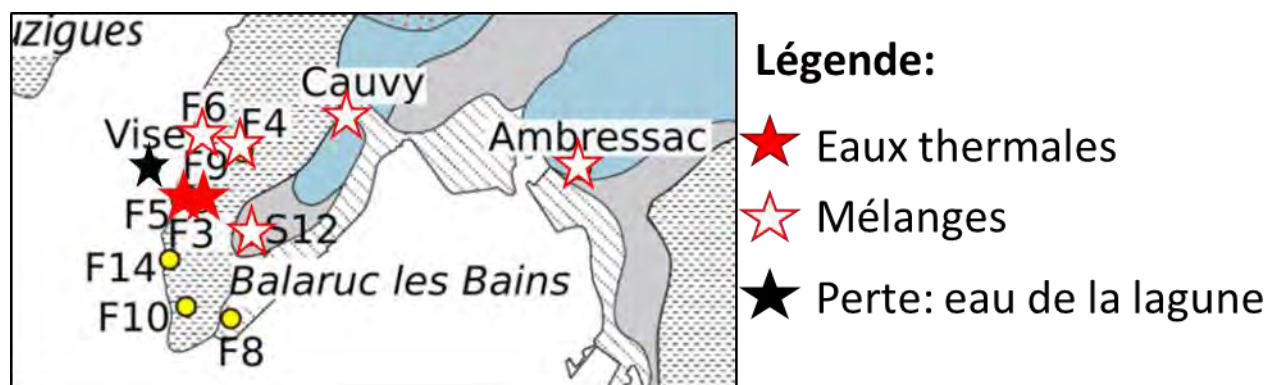


Figure 2: Localisation des points de prélèvement pendant l'inversac

2.1.3. Prélèvements des forages de la plateforme scientifique expérimentale

Dans le cadre du projet DEM'Eaux Thau 4 forages ont été forés à proximité du forage F6 (initialement 3 forages, mais le DGMT3 a dû être abandonné et a été remplacé par le DGMT4 (cf BRGM/RP-70842-FR, Ladouche et al., 2022) afin de mieux caractériser les circulations d'eaux des différentes lithologies présentes sur la presqu'île de Balaruc-les-Bains. En particulier, des essais de pompages ont été réalisés sur les différents ouvrages permettant d'une part d'estimer les propriétés hydrodynamiques de l'aquifère et d'autre part de prélever des échantillons d'eaux.

Les principales informations concernant ces pompages et leurs échantillonnages associés sont présentées dans le Tableau 2.

Tableau 2: Présentation des essais de pompages et des prélèvements associés sur les forages de la plateforme scientifique expérimentale.

	DEMT1	DEMT2	DEMT3	DEMT4	
Lithologies	Carbonate (Jurassique)	minéraux argileux (Miocène)	Carbonate (Jurassique)	Carbonate (Jurassique)	Carbonate (Jurassique)
Profondeur échantillonnée	128 - 178 m	20 - 40 m	200 m et 280 m	620 et 759 m	390 et 759 m
Durée pompage	24 h	4 h	24 h	24 h	24 h
Q pompage	25 m ³ /h	6.3 m ³ /h	3 à 4 m ³ /h	5 m ³ /h	5 m ³ /h
Echantillons (date)	T ₀ +1h (27 mai 20)	T ₀ +1h30 (2 juin 20)	T ₀ +4h (11 jan. 21)	T ₀ +4h (15 nov. 21)	T ₀ +4h (17 nov. 21)
	T ₀ +24h (28 mai 20)	T ₀ +4h (2 juin 20)	T ₀ +24h (12 jan. 21)	T ₀ +24h (16 nov. 21)	T ₀ +24h (18 nov. 21)

L'objectif principal du volet géochimie concernant ces quatre forages est d'obtenir les signatures caractéristiques des milieux dans lesquels les eaux circulent. Ainsi le forage DEMT2 est le seul forage permettant de caractériser les eaux provenant des minéraux argileux du Miocène. Les forages DEMT1, DEMT3 et DEMT4 permettent de prélever et de caractériser les eaux dans l'aquifère Jurassiques à différentes profondeurs. En particulier le DEMT4 permet d'atteindre des grandes profondeurs (759 m), informant sur les signatures des eaux ayant a priori longuement circulées dans les carbonates.

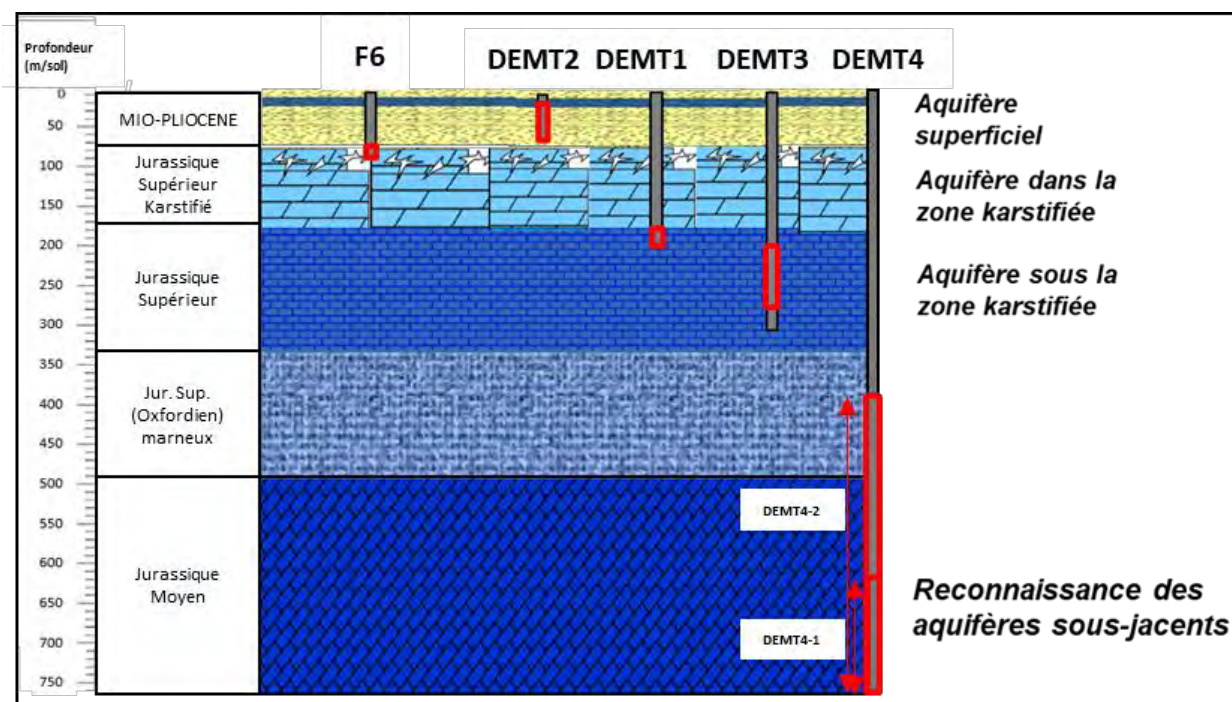


Figure 3 : Représentation schématique de l'implantation des ouvrages réalisés et aquifères-cibles de la plateforme DEM'Eaux Thau

2.1.4. Prélèvements de la Vise

L'évolution détaillée de la conductivité et de la température de l'eau qui transite par le dispositif de prélèvement sous-marin de la Vise (BRGM/RP-70842-FR, Fig. 8) a mis en évidence des variations des paramètres physico-chimiques au cours du temps. Il a été montré (BRGM/RP-70842-FR) que ce dispositif n'est pas étanche, provoquant à certaines périodes des arrivées d'eau saumâtre de la lagune dans le système de prélèvements. Ainsi, certains prélèvements de la Vise peuvent être contaminés par des eaux de la lagune. Le tableau suivant présente les résultats des analyses physico-chimiques et permet d'identifier par un fond gris les mesures influencées par l'eau de la lagune.

Tableau 3: Résultats physico-chimiques des points de prélèvement de la Vise et mise en exergue des prélèvements impactés par les eaux de la lagune.

Date	Contexte	T°C	pH	Conductivité (µS/cm)	Influence eau de la lagune
24/09/2019		20,2	7,2	2460	non
10/12/2019	Hautes eaux	14,4	7,1	2490	non
22/01/2020		13,5	7,0	12420	oui
26/02/2020		15,4	7,0	3870	non
04/06/2020		21,3	7,1	2330	non
07/07/2020		21,6	7,2	2850	non
03/09/2020		21,1	7,2	4230	oui
08/10/2020		18,7	7,0	4700	oui
12/11/2020		17,3	7,0	12250	oui
07/01/2021	Inversac	5,7	8,2	58200	oui
29/06/2021	Inversac	24,6	8,0	58200	oui

2.2. ANALYSES EFFECTUEES

2.2.1. Campagne mensuelle

Le tableau suivant présente pour chaque campagne et chaque site échantillonné la liste des paramètres mesurés.

Tableau 4 : Liste des échantillons par campagne et des analyses réalisées (2020).

Campagne	site	Anions	Cations	Traces	TAC	Bacterio	REE	² H	¹⁸ O	COT	MON-fluo3D	$\delta^{11}\text{B}$	$\delta^7\text{Li}$	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	Radon	CFC/SF6	Gaz nobles	³ H
Janv. 20	CAUVY																	
	AMBRESSAC																	
	WISE																	
	Forage F6																	
	Forage F5																	
Fev. 20	S12 Ecole																	
	CGE Tennis																	
	CAUVY																	
	AMBRESSAC																	
	WISE																	
Mai 20	Forage F6																	
	Forage F5																	
	S12 Ecole																	
	DEM-T1.1																	
	DEM-T1.2																	
Juin 20	Forage F6																	
	Forage F5																	
	S12 Ecole																	
	CAUVY																	
	AMBRESSAC																	
Juil. 20	WISE																	
	Forage F6																	
	Forage F5																	
	S12 Ecole																	
	CGE-Tennis																	
Sept. 20	CAUVY																	
	AMBRESSAC																	
	WISE																	
	F6																	
	F5																	
Oct. 20	S12 Ecole																	
	CGE-Tennis																	
	CAUVY																	
	AMBRESSAC																	
	WISE																	
Nov. 20	F6																	
	F5																	
	S12 Ecole																	
	CGE-Tennis																	
	CAUVY																	

Remarque : en vert, analyse réalisée ; en gris, analyse non réalisée

2.2.2. Echantillonnage de l'inversac

Le tableau suivant présente pour chaque campagne et chaque site échantillonné la liste des paramètres mesurés.

Tableau 5: Liste des échantillons par campagne et des analyses réalisées (2020-2021).

Campagne	site	Anions	Cations	Traces	TAC	Bacterio	REE	² H	¹⁸ O	COT	MON-fluo3D	$\delta^{11}\text{B}$	$\delta^7\text{Li}$	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	Radon	CFC/SF6	Gaz nobles	³ H	³⁶ Cl	¹⁴ C
3-4 Dec. 20	Cauvy																			
	Ambressac																			
	F6																			
	DEMT1																			
	F4 Hotel																			
	F5																			
10 Dec. 20	S12 Ecole																			
	Cauvy																			
	Ambressac																			
15 Dec. 20	S12 Ecole																			
	Cauvy																			
	Ambressac																			
	F6																			
7-8 Janv. 21	F5																			
	F6																			
	S12 Ecole																			
	Cauvy																			
	Ambressac																			
	DEMT1																			
	Vise/Etang																			
	DEMT3-1																			
11 Janv. 21	DEMT3-2																			
	Cauvy																			
11 Fev. 21	Ambressac																			
	F4 Hôtel																			
	F6																			
	S12																			
29-30 Juin 21	Vise/Etang																			
	F4 Hotel																			
	F9																			
	F6																			
	F5																			
	S12 Ecole																			
Du 15 au 24 Nov. 21	Cauvy																			
	DEMT4-1 T0+4h																			
	DEMT4-1 T0+24h																			
	F6																			
	F5																			
	F4																			
	DEMT4-2 T0+4h																			
	DEMT4-2 T0+24h																			
	S12 Ecole																			

Rem : en vert, analyse réalisée ; en gris, analyse non réalisée

3. Résultats des campagnes mensuelles (2020)

Cette première partie présente les résultats des campagnes mensuelles de 2020 des ouvrages karstiques (Ambressac, Cauvy, CGE-Tennis), thermaux (F5 et S12 Ecole) et de mélanges (F6). Les tableaux de résultats sont présentés en annexe 2. Les résultats et/ou figures complémentaires non abordés dans cette partie sont présentés en annexe 3 (comme par exemple les résultats du radon 222 en A3.1 et des REE en A3.2).

Les résultats de la Vise et des nouveaux forages de la plateforme scientifique expérimentale seront traités à part, dans la partie 5. Pour rappel, la crise du COVID-19 n'a pas permis de réaliser des prélèvements sur la période de mars à mai 2020.

3.1. PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES ET PARAMETRES CHIMIQUES

3.1.1. Généralités

Les principaux éléments majeurs sont représentés dans le diagramme de Piper (Figure 4), permettant de représenter la chimie des eaux en fonction des cations et anions majeurs et d'en définir le type d'eaux de chaque échantillon. Les gammes de variations des paramètres physico-chimiques et chimiques des eaux suivis lors des campagnes mensuelles ont les mêmes ordres de grandeur et variations que les données mesurées sur les campagnes spatiales (2018-2019), confirmant les interprétations faites précédemment (voir rapport BRGM/RP-71281-FR).

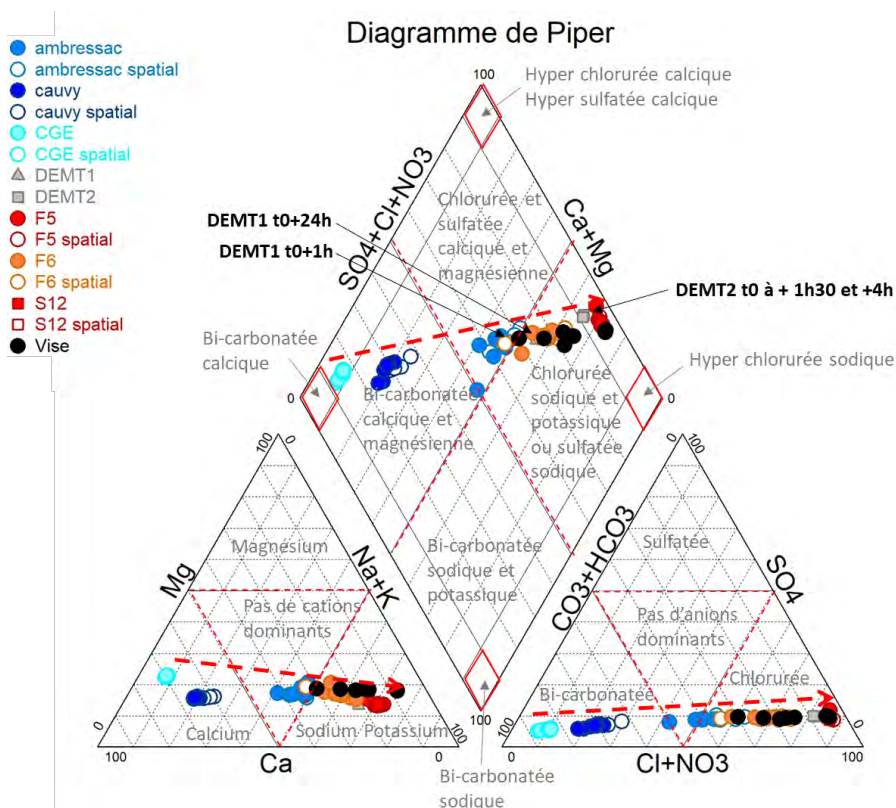


Figure 4: Diagramme de Piper des campagnes 2018-2020. Les figurés vides correspondent aux campagnes spatiales (2018-2019) et les figurés pleins aux campagnes mensuelles (2020).

Les eaux karstiques (CGE tennis et Cauvy) sont bicarbonatées calciques à magnésienne et les eaux thermales chlorurées sodiques et potassiques. A la différence des autres points de prélèvements, les eaux d'Ambressac et de F6 varient de manière importante (principalement pour les anions), entre un pôle bicarbonaté et un pôle chloruré, rappelant le mélange entre les eaux karstiques et les eaux thermales (rapport BRGM/RP-71281-FR).

3.1.2. Evolution de la salinité

La totalité des eaux échantillonnées pour cette étude s'aligne dans les diagrammes binaires Na/Cl (Figure 5a), et K/Cl (non représenté) sur la droite de dilution de l'eau de mer, entre un pôle d'eau de pluie locale (Mèze, environ 6 km de l'exutoire de la Vise) et un pôle marin. En considérant la droite de mélange de l'eau de mer, il est possible d'estimer les proportions de mélange en utilisant par exemple ici les concentrations en Na, Cl et K (Figure 6). Cette corrélation se retrouve aussi dans le diagramme $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ (Figure 5b), entre un pôle marin et un pôle karstique. De la même façon, les proportions de mélange ont été estimées avec les isotopes stables de l'eau. Ces derniers sont toutefois à prendre avec prudence puisque les deux pôles (marins et karstiques) ne peuvent être déterminés avec précision. En effet, Il n'est pas possible de déterminer qui du pôle d'eau de mer (prélèvement du 01/06/2012 au port du Barcarès, Petelet et al., 2016) ou des eaux de la lagune (prélèvement du 08/10/2010) est l'origine des eaux marines des eaux thermales. Le pôle karstique est quant à lui difficile à estimer puisque la signature en isotope stable de ces eaux varie au cours du cycle hydrologique. Ces variations temporelles traduisent des variations saisonnières des caractéristiques de la recharge (température, quantité de précipitation, altitude de formation de la précipitation...). Il a été proposé ici de considérer les eaux de mer (prélèvement du 01/06/2012 au port du Barcarès, Petelet et al., 2016) comme pôle marin et la moyenne des eaux de CGE Tennis (2018-2021) comme pôle karstique. Les variations relatives entre le pôle marin d'eau de mer (Petelet et al., 2016) par rapport à lagune (prélèvement du 08/10/2010) sont de 5% pour le $\delta^2\text{H}$, d'environ 10% pour le $\delta^{18}\text{O}$, Cl et Na et 20% pour le K. Les résultats sont illustrés dans la Figure 6 et présenté en annexe 3.3.

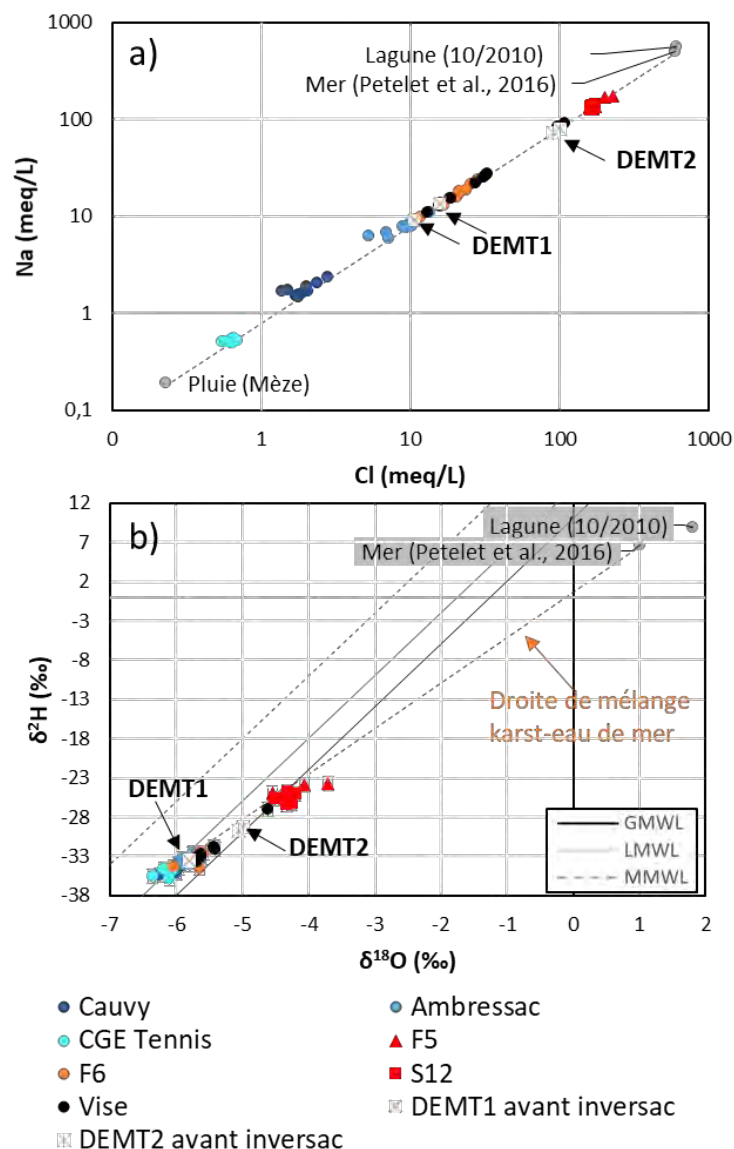


Figure 5: Digramme binaire des (a) concentrations en Na en fonction des concentrations en Cl et (b) compositions en isotopes stable de l'eau ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$) des campagnes de 2018 à 2020.

Les eaux karstiques ont un apport de Na et Cl provenant principalement des eaux de pluie (apport d'eau de mer négligeable, inférieur à 0,5 %) chargées en embruns marins et possédant donc des rapports en Na/Cl et K/Cl similaires à celui de la mer. Dans le cas de CGE-Tennis, cet apport est négligeable, inférieur à 0,2% d'eau marine (Figure 6a). Les eaux thermales (F5 et S12), quant à elles, sont des mélanges entre des eaux karstiques et des eaux de mer. Les proportions d'eau de mer des campagnes mensuelles (2020) sont estimées en moyenne à environ 30% (25% pour les isotopes stables de l'eau, Figure 6b), ce qui est cohérent avec les études précédentes (rapport BRGM/RP-71281-FR Ranchoux et al., 2022, Aquilina et al. 2002). Les proportions de mélanges évoluent en fonction des conditions hydrologiques avec une proportion d'eau de mer plus importante en janvier 2020 (42% et 32% estimé par les concentrations en Cl pour F5 et S12 respectivement).

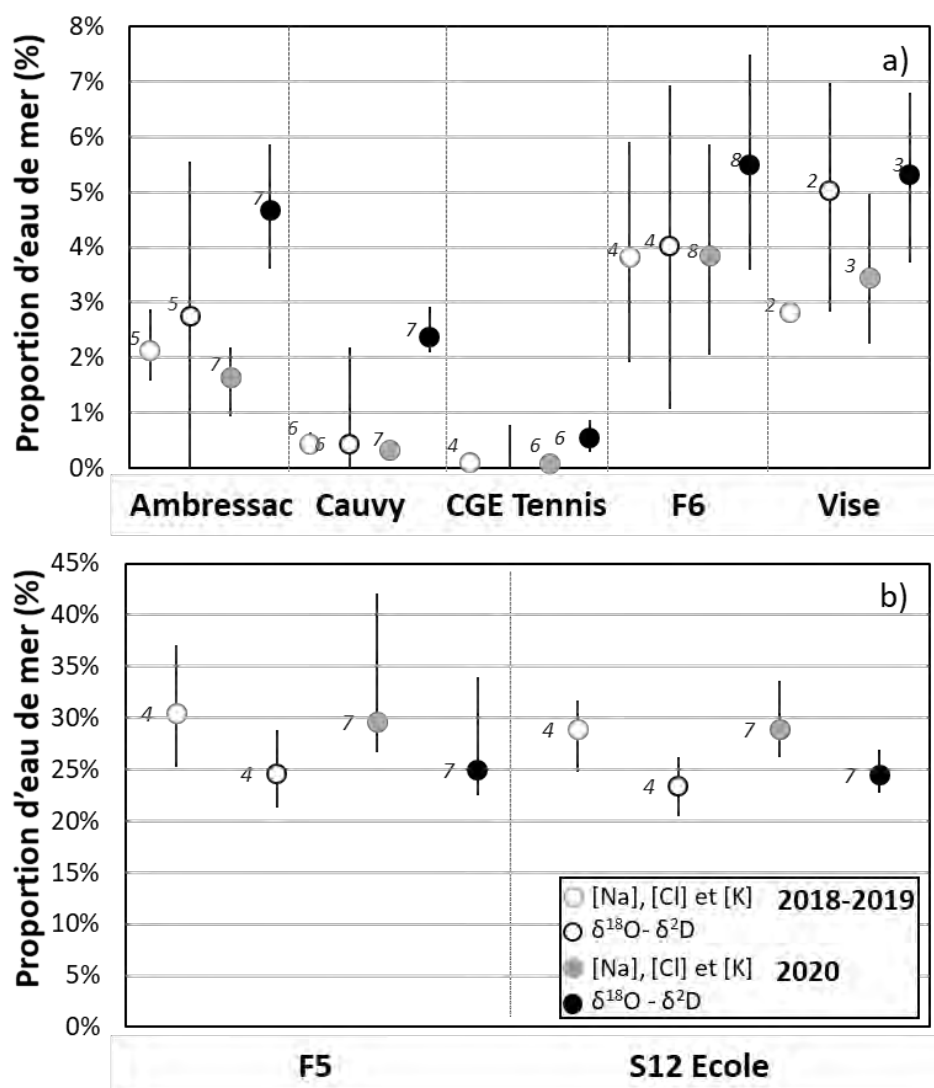


Figure 6: Proportions d'eau de mer (moyenne, minimum et maximum en %) estimé par les concentrations en Cl, Na, K (en gris) et les isotopes stables de l'eau $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{D}$ (en noir) pour Ambressac, Cauvy, CGE-Tennis, la Vise, F6 et la Vise d'une part (a) et F5 et S12 école (b) d'autre part. Les données spatiales sont représentés par les cercles vides, et les nouvelles données mensuelles en cercles pleins. Le numéro d'index correspond au nombre d'échantillon par période. Seul les échantillons de la Vise non impactés par les eaux de la lagune (voir texte partie 2.1.4) ont été utilisée ici.

Enfin, les sources de Cauvy et d'Ambressac ainsi que le forage F6 ont des proportions d'eau marine de 0,34%, 1,66% et 3,86% respectivement (calculé via les concentrations en Cl, Na et K sur les données de 2020, Figure 6). Les études précédentes (Aquilina et al. 2002, rapport BRGM/RP-71281-FR, Ranchoux et al., 2022) ainsi que les paramètres physico-chimiques (Figure 37) ont montré que l'apport d'eaux salées dans ces ouvrages ne peuvent pas s'expliquer par un apport d'eau de la lagune, ni d'eau de mer, et proviennent donc d'un mélange avec les eaux thermales. En considérant un mélange binaire entre un pôle d'eaux de pluie locale (Mèze) et un pôle thermal (moyenne F9 2018-2020), on obtient des proportions de mélange suivant (Tableau 6):

Tableau 6 : Estimation des proportions d'eau thermale (en %) calculées avec les concentrations de Cl, des échantillons de 2018 à 2020. Le pôle thermal est ici représenté par la moyenne des concentration du forage F9

Date	% eau thermique (estimation au [Cl])			
	Cauvy	Ambressac	Vise	F6
mars-18	1,5%	9,4%		19,2%
août-18	1,3%	5,6%		15,1%
mai-19	1,1%	5,2%		6,3%
décembre-19	1,1%	7,9%	9,2%	10,9%
janvier-20	1,1%	4,1%		9,8%
février-20	0,8%	3,0%	16,1%	6,8%
juin-20	0,7%	4,0%	7,6%	12,6%
juillet-20	0,9%	6,2%	11,0%	12,6%
septembre-20	1,0%	6,0%		14,1%
octobre-20	0,9%	5,5%		19,1%
novembre-20	0,9%	5,9%		12,0%

La Figure 7 met en évidence que généralement plus les niveaux d'eau sont haut, plus les proportions d'eaux thermale sont importantes. Ceci est particulièrement visible pour les eaux de Cauvy et d'Ambressac. Ces résultats sont en accord avec les résultats précédents (BRGM/RP-71281-FR). Ceci est toutefois moins clairs sur les derniers mois. Le schéma conceptuel que nous proposons pour expliquer ce phénomène est qu'en période de plus hautes eaux, les lignes de courant profondes sont plus mobilisées ce qui se traduit par une contribution plus importante d'eau profonde minéralisée.

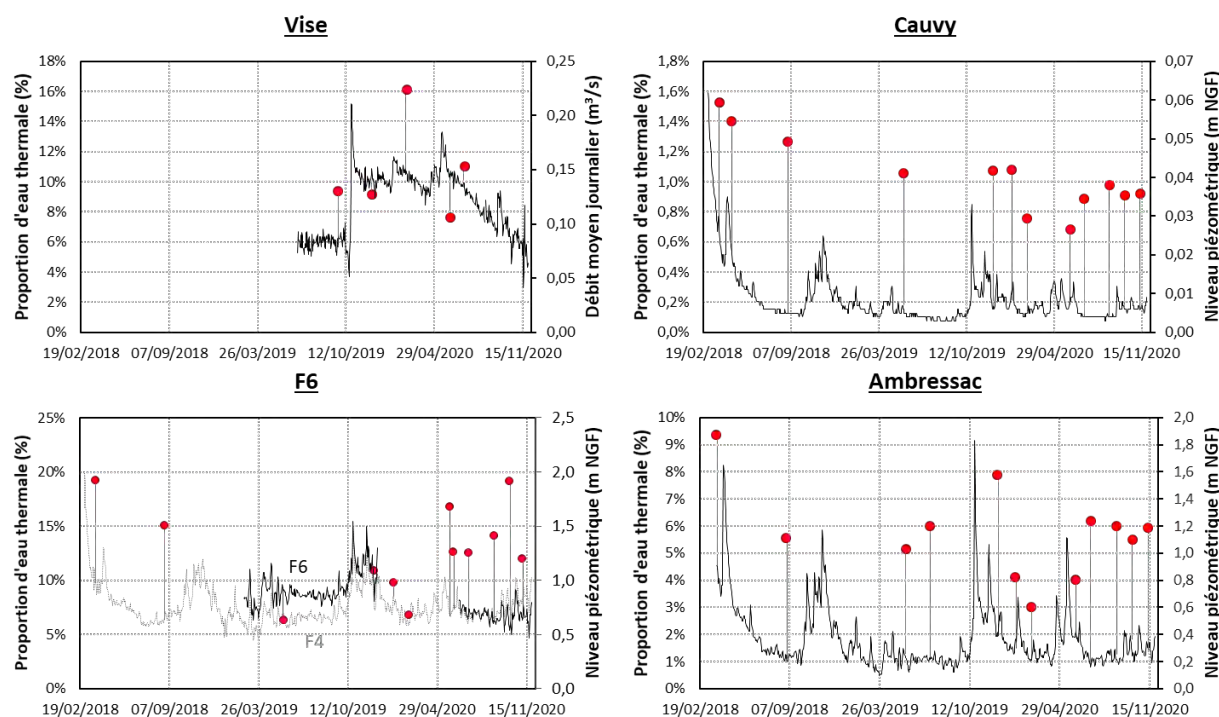


Figure 7 : Niveau piézométrique ou débit moyen journalier de la Vise, du forage F6 et des sources Cauvy et Ambressac, associés à la proportion d'eau thermique estimée pour chacun des prélèvements (points rouges).

3.1.3. Interactions eaux roches

Les nouveaux résultats des campagnes mensuelles confirment les observations réalisées sur les résultats des campagnes spatiales. Ainsi, (1) les eaux karstiques sont enrichies en Ca, Mg, SO₄ et HCO₃ par rapport à la droite de dilution de l'eau de mer (annexe 3.6) et (2) les concentrations en Ca, HCO₃ et Mg des eaux karstiques ne s'alignent pas sur la droite de dissolution de la calcite ou de la dolomite (annexe 3.7). Il a été précédemment interprété (BRGM/RP-71281-FR) que les eaux de pluies se sont chargées en ces éléments par des processus d'interaction eau-roche, et en particulier par des processus de dissolution incongruente des carbonates avec précipitation de calcite. Les nouveaux résultats ne nous permettent pas de discuter plus en détail de la variation temporelle de ces processus puisque comme préciser dans la partie précédentes, l'essentiel des points de prélèvements sont des mélanges entre les eaux karstiques et marines. Ceci est particulièrement le cas pour F6, Ambressac et Cauvy.

Les eaux thermales, comme précédemment, ont des concentrations en SO₄, Mg, Na qui s'alignent sur la droite de dilution de l'eau de mer (annexe 3.6) indiquant que ces éléments proviennent essentiellement d'un mélange avec les eaux de mer, et non des processus d'interaction eau roches. Les eaux thermales sont toutefois enrichies en Ca et HCO₃, avec $[Ca] \gg [HCO_3]$, preuve que ces eaux sont en interaction avec des roches carbonatées. Il a été précédemment proposé que les eaux thermales, fortement concentrées en Mg par l'apport d'eau marine, interagissent avec les carbonates en transformant la calcite en dolomite (dolomitisation).

3.1.4. Evolution temporelle des principaux éléments majeurs

Les données des nouvelles campagnes permettant d'observer les variations temporelles à l'échelle mensuelle. Les figures en annexe 3.4 et 3.5 illustrent les évolutions temporelles des concentrations en Cl, HCO₃, Mg, Ca et SO₄ et des niveaux piézométriques des ouvrages suivis sur la période 2018-2021.

Les résultats des campagnes mensuelles ne mettent pas en évidence une relation claire entre l'évolution des niveaux piézométriques et les évolutions des concentrations des éléments observés, même si généralement, plus le niveau piézométrique est haut et plus les concentrations semblent élevées. En effet, une augmentation du niveau piézométrique n'est pas nécessairement associée à une augmentation (ou diminution) des concentrations. Ceci est particulièrement visible dans le cas d'Ambressac : pour les trois premiers prélèvements (décembre 2019, janvier 2020 et février 2020), les concentrations en Cl, Na, Ca et SO₄ diminuent en parallèles du niveau piézométrique pouvant indiquer une corrélation entre les niveaux d'eaux et les tendances observées. Toutefois, cela n'est plus le cas pour les campagnes suivantes : l'augmentation des niveaux piézométriques en avril – mai 2021, n'est pas directement corrélée avec une augmentation des concentrations. De plus, et en particulier, après l'augmentation des concentrations observées en juillet, les concentrations restent relativement stables alors que les niveaux piézométriques ont fortement diminuées. Cela pose la question du schéma conceptuel pouvant expliquer ces processus. Plus généralement, ces résultats montrent la complexité d'interpréter des données temporelles à l'échelle mensuelle puisque l'information n'est que partielle et ne nous permet pas de suivre un événement. Autrement dit, avec un pas de temps discontinu (dépendant des périodes de prélèvement), il est difficile de se placer sur les tendances observées avec les hauteurs piézométriques puisqu'elles ne semblent pas être directement corrélées. Un prélèvement plus fin en période de fortes variations hydrologiques pourrait permettre de mieux informées sur les schémas de circulations des eaux, des mélanges et des interactions eaux-roches.

Il est toutefois important de noter que les tendances observées pour les concentrations en Mg, Ca et SO₄ sont directement corrélées à celle du Na et Cl. Ceci est particulièrement le cas pour Ambressac, Cauvy et F6. Ainsi, les évolutions des signatures chimiques des eaux proviennent essentiellement de l'évolution des proportions de mélanges entre les eaux karstiques et les eaux d'origine marines. Il n'est donc pas possible ici de mettre en évidence les évolutions des signatures des eaux karstiques seules (et donc informer sur les interactions eaux roches) puisque les mélanges avec les eaux de marines occultent ces effets. Seules les signatures des eaux de CGE Tennis, n'étant pas impactées par les eaux marines pourraient être interprétées en termes d'interactions eau-roche, les variations étant toutefois trop faibles (dans les barres d'erreur).

Enfin, les concentrations des eaux de F5, S12 Ecole et CGE Tennis sont relativement stables au cours du temps, suggérant que le système est en équilibre et qu'il s'agit toujours du même type d'eau qui alimente ces ouvrages.

3.2. TRACEURS DES CONTAMINATIONS DE SURFACE-FLUX DE SURFACE

3.2.1. Bactériologie et nitrates

Il existe différents outils qui permettent de tracer les flux de surface en s'appuyant sur les flux de contaminants associés. La présence de nitrate par exemple (NO₃) dans les eaux karstiques est la plupart du temps due à un apport anthropique lié à l'agriculture, l'industrie ou les eaux usées. De mêmes, les bactéries tels que les coliformes (totaux ou fécaux), indicateur de la qualité de l'eau, peuvent informer sur des apports d'eaux usées. En particulier, les coliformes fécaux (*Escherichia coli*) sont souvent utilisés dans l'étude des eaux souterraines comme traceurs de circulation rapide puisqu'ils ont un taux de survie inférieur à la semaine (Personné et al., 1998).

Les échantillons d'eaux de CGE tennis et les eaux thermales F5 et F6 ne sont pas contaminés par les coliformes (inférieurs à 2 UFC), preuve que ces eaux ne sont pas contaminées par des flux rapides d'eaux usées récentes. Les eaux de F5 ont des concentrations en nitrates généralement négligeables indiquant que les flux de surface sont négligeables pour ce forage.

Les concentrations significatives en nitrates, compris entre 2 et 20 mg/L analysées dans les eaux karstiques (Ambressac, Cauvy, CGE-Tennis) et dans certains forages thermaux (S12 et F6) mettent en évidence une pollution anthropique dans ces eaux. Comme précisé dans le rapport BRGM/RP-71281-FR, une grande partie de l'origine des nitrates dans ces eaux peut être liée aux activités agricoles, en particulier provenant du massif de la Gardiole, mais aussi liée à une contamination par les réseaux d'eaux usées défectueux et/ou de fosses septiques. De plus, les teneurs particulièrement élevées d'Ambressac peuvent être également en partie liés à l'histoire industrielle du site : l'usine sud Fertilisant a été implantée proche de d'Ambressac, usine qui a ensuite été démantelée au début des années 2000.

Les eaux d'Ambressac ont en parallèle de fortes concentrations en coliformes totaux (65-2420 UFC) et fécaux (151400 UFC) confirmant l'existence d'une pollution récente et locale d'eaux usées. Les concentrations les plus hautes sont mesurées en juin et juillet 2020. Sur les mêmes périodes, les ouvrages S12 Ecole et Cauvy (et à plus faible mesure F6) enregistrent aussi les plus hautes valeurs en coliformes totaux. La relation entre les niveaux piézométriques et les concentrations en coliformes n'est pas évidente, ne nous permettant pas d'interpréter ces résultats en termes de dynamique. Il est toutefois intéressant de noter que tous ces ouvrages étant affectés par cette contamination en coliforme à la même période, il peut s'agir de la même contamination. De plus, les ouvrages Ambressac et S12 Ecole sont affectés avec les mêmes gammes de concentrations, pouvant mettre en évidence une connexion hydraulique entre ces

différents ouvrages, confirmant des observations similaires réalisées avec les analyses microbiologiques des campagnes spatiales (BRGM/RP-71281-FR).

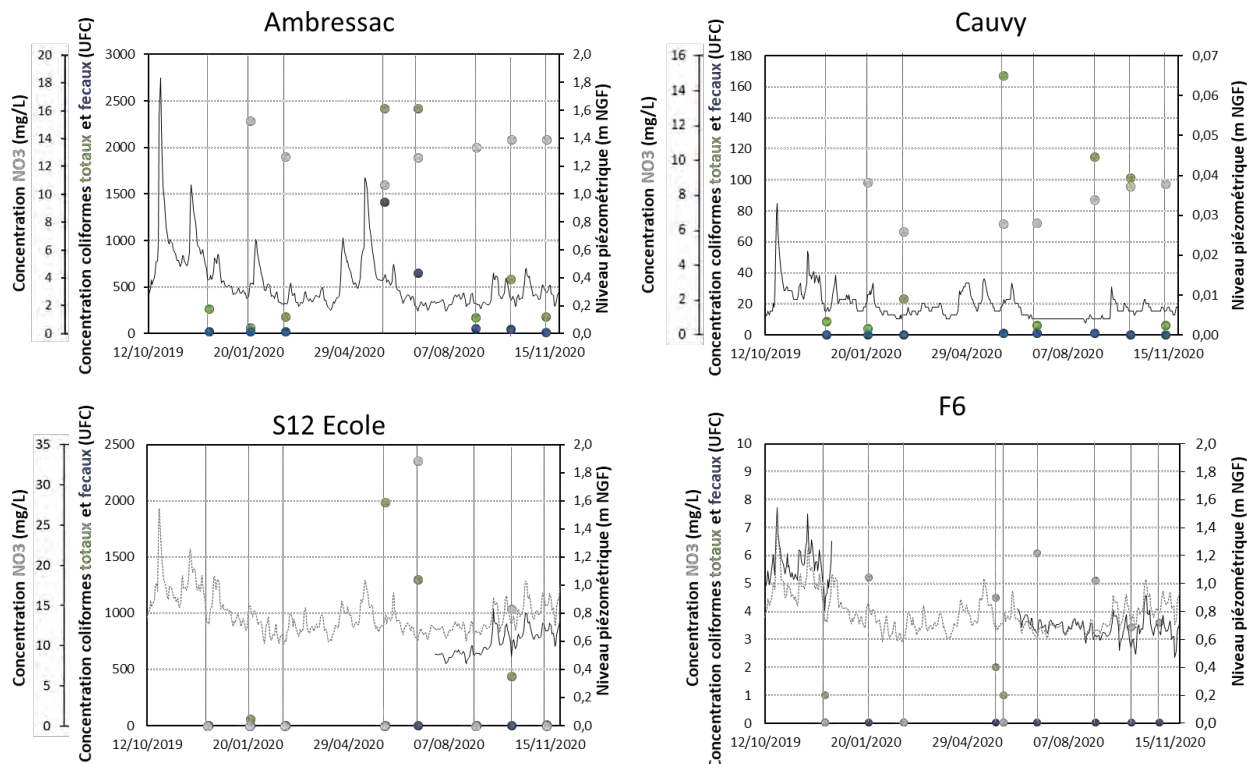


Figure 8: Evolution des concentrations en coliformes totaux et fécaux, des concentrations en NO₃ et des niveaux piézométriques de Ambressac, Cauvy S12 Ecole et F6 pendant les campagnes mensuelles de 2020.

3.2.2. Caractérisation des composés organiques dans les eaux des campagnes spatiales (2018-2019)

La composition de la Matière Organique Naturelle (MON) a été étudiée en quantifiant d'une part le Carbone Organique Total (COT) et d'autre part, en étudiant le signal de fluorescence naturelle par spectrofluorimétrie 3D. En effet, le COT est un moyen d'évaluer la quantité de composés organiques présents sous forme dissoute et particulaire dans les eaux, la grande majorité de la MON correspondant à des composés liés au carbone. La MON étant constituée de molécules aromatiques plus ou moins complexes, il est possible de caractériser les grandes familles de composés qui la composent en analysant les échantillons d'eau par spectrofluorimétrie 3D (cf partie Annexe 1).

Le COT est un traceur couramment utilisé pour caractériser les flux d'infiltration rapide, notamment en milieux karstiques (Albéric et Lepiller, 1998 ; Emblanch et al., 1998; Batiot et al., 2003).

L'étude du signal de fluorescence de la MON dans les aquifères karstiques a récemment montré la pertinence de cet outil dans l'étude des modalités de circulation au sein de ces systèmes (Batiot et al., 2008 ; Blondel, 2008 et Mudarra et al., 2011), ainsi que pour caractériser la vulnérabilité des aquifères karstiques face aux contaminations anthropiques.

La MON est composée de molécules d'origine naturelle pédologique (composés de types humiques- humic-like : H1 et H2, voir Annexe 1) et peut également contenir des composés d'origine anthropique (composés de types protéiques spécifiques -protein-like : P1 bis, P1, Trp1, Trp2, Tyr1 et Tyr 2, voir Annexe 1). Quiers et al. 2014 ont montré dans l'aquifère karstique du Lez, que certains composés protéiques étaient souvent corrélés à l'arrivée de flux contaminés par des eaux usées traitées ou non, marqués par des teneurs importantes en bactéries fécales, notamment en période de crue.

Afin de pouvoir caractériser la composition organique des divers types de flux interagissant au sein du système thermal de Balaruc-Thau, et notamment mettre en évidence des flux de surface infiltrés rapidement, nous avons comparé les teneurs en COT et signaux en fluorescence naturelle des campagnes de Mars 2018 et Aout 2018.

Les fluorophores présents dans les eaux thermales et karstiques sont représentés dans la Figure 9.

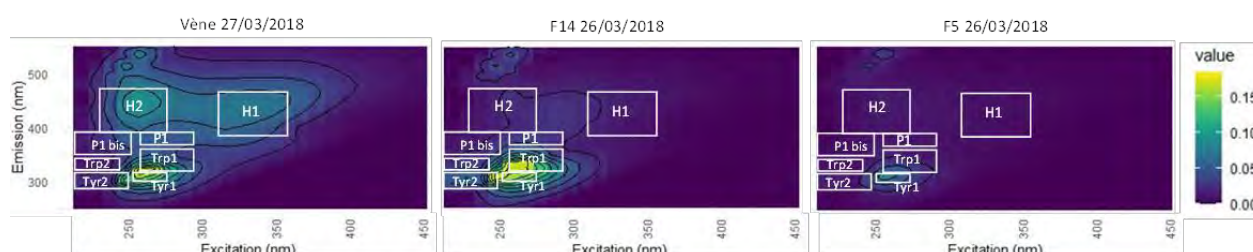


Figure 9: Identification des composés organiques fluorescents pour les échantillons de la source karstique de la Vène et de deux forages thermaux (F14 et F5), en mars 2018

La composition de la MON varie selon les échantillons et également au cours du temps, avec des intensités de fluorescence plus ou moins fortes pour les composés humiques et protéiques, liés à la quantité de ces composés.

La Figure 10 représente les variations de l'intensité totale de fluorescence, obtenue en sommant les intensités de chaque fluorophore identifié pour chaque échantillon, ainsi que les variations des teneurs en COT pour les divers points échantillonnés en mars et aout 2018.

Les résultats obtenus ne sont pas conformes à ceux que l'on aurait pu attendre. En effet, pour des eaux ayant des temps de séjour supérieurs à quelques mois, la majeure partie du COT est dégradée par les bactéries du milieu et le signal de fluorescence correspondant devrait être faible. Or si l'on considère globalement les forages thermaux par rapport aux autres forages et sources, les valeurs de la fluorescence totale et du COT sont dans des gammes comparables. Les intensités de fluorescence totale varient de 0,05 à 0,87 pour les forages thermaux et de 0,09 à 0,74 pour les autres points échantillonnés. Les teneurs en COT des forages thermaux en aout 2018 (F5, F8, F9 et S12) sont basses (< 1 mg/l), mais présentent des valeurs comparables avec les forages/sources karstiques échantillonnés en mars 2018.

Divers tests ont été réalisés au laboratoire HydroSciences Montpellier pour exclure tout biais analytique et/ou problème de contamination lié aux protocoles de prélèvement concernant ces deux méthodes de quantification, validant ainsi les résultats obtenus. Le fait que les eaux thermales soient constituées d'une part plus ou moins importante d'eaux karstiques récentes, mise en évidence par l'apport de CFC-SF6, peut en partie expliquer ces résultats.

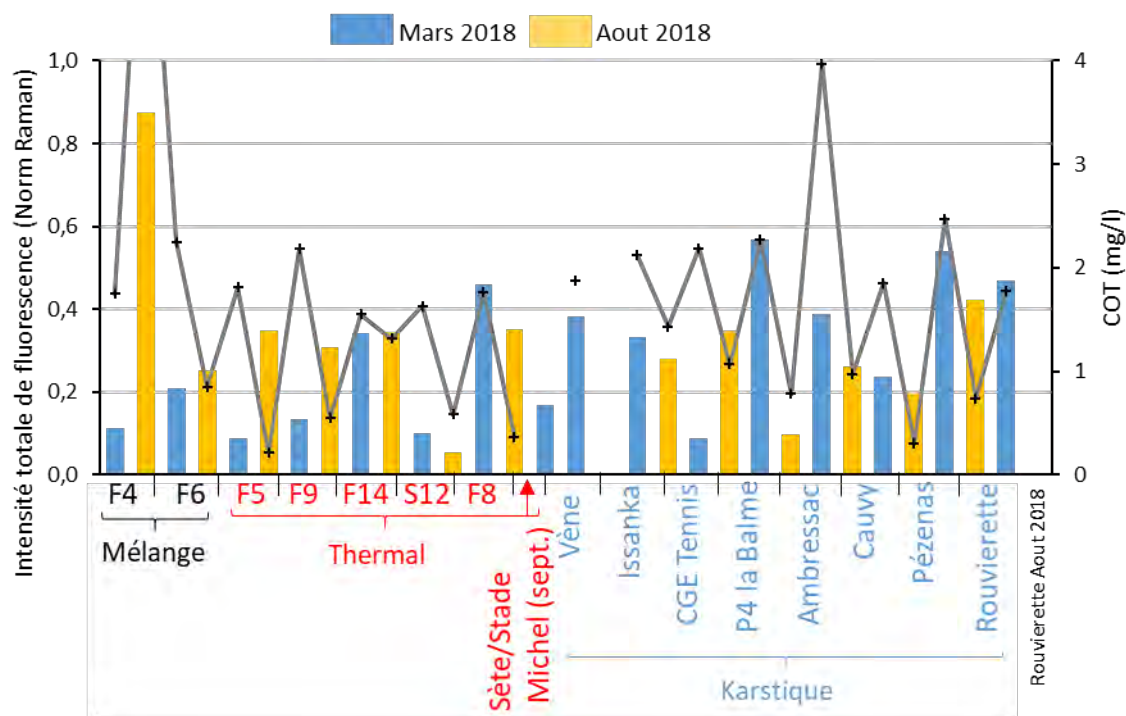


Figure 10: Evolution de l'intensité de fluorescence totale et du COT pour les campagnes de Mars et Aout 2018

Les valeurs des intensités de fluorescence des composés de types humiques et protéiques ont été sommées de façon à comparer l'évolution spatiale de leur proportion au sein de cet hydrosystème et également d'appréhender leur évolution temporelle (Figure 11).

Les proportions de composés de types humiques sont plus importantes dans les forages/sources karstiques que dans les forages thermaux et est plus importantes en mars qu'en aout 2018 (pour les forages/sources karstiques) indiquant que dans ce cas, les composés humiques semblent tracer l'infiltration rapide, en accord avec les tenures de COT (teneurs plus élevées en mars qu'en aout 2018 pour les forages/sources karstiques).

Certains forages thermaux et/ou de mélange comme S12 et F4, F5, F9 en mars uniquement présentent des intensités de fluorescence, teneurs en COT et proportions en composés protéiques faibles. Cependant, les autres forages (F14, F8 et F6 ainsi que F4, F5, F9 en aout) présentent des intensités de fluorescence comparables aux forages/sources karstiques pour les composés protéiques, ce qui est tout à fait surprenant pour des eaux thermales. Nous avons vu précédemment que ces composés caractérisaient normalement les infiltrations très rapides, notamment impactées par des contaminations anthropiques en lien avec l'infiltration rapide d'eaux usées (traitées ou non), comme cela a pu être mis en évidence dans le système karstique du Lez (Quiers 2014). Or, cela ne correspond pas à ce qui est observé ici.

La présence de composés organiques de types protéiques dans les eaux indique une activité bactérienne. Dans les eaux de surface et les eaux karstiques, cette activité est en lien avec l'apport d'eaux usées dans le milieu (Baker 2002, Hudson et al., 2008). Pour les eaux thermales, les autres traceurs géochimiques ou bactériologiques n'indiquent pas d'infiltration rapide d'eaux usées, qui n'est pas non plus plausible par rapport au contexte hydrogéologique connu. **Une hypothèse serait que ces composés organiques de type protéique pourraient être issus de l'activité des communautés bactériennes spécifiques identifiées dans les eaux**

thermales (cf. Livrable L5a, BRGM/RP-71281-FR). A ce stade, il est difficile de conclure car l'étude de la fluorescence naturelle des eaux karstiques se développe ces dernières années compte-tenu de la vulnérabilité de ces systèmes, mais nous n'avons pas trouvé de données comparables observées dans des systèmes thermaux.

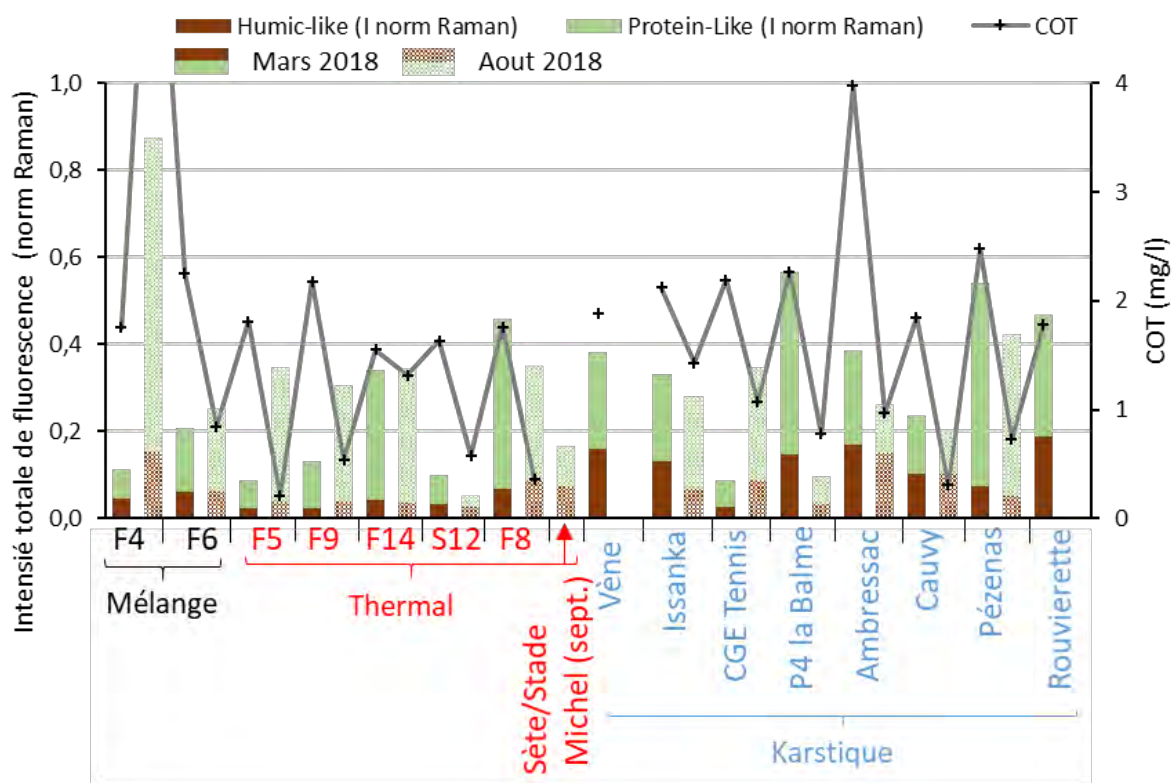


Figure 11: Proportions des composés organiques de types humiques et de types protéiques et teneurs en COT pour les campagnes de Mars et Aout 2018

3.3. APPORT DES OUTILS ISOTOPIQUES

3.3.1. Isotopes du Strontium

Les valeurs isotopiques en $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ dans les eaux des différents points de prélèvement de 2018-2020 sont illustrées en fonction de l'inverse de la concentration en strontium (Figure 12). Cette représentation permet de distinguer les différentes masses d'eaux et de tracer des droites de mélange (Faure, 1986). Plus généralement, les rapport isotopiques $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ informent sur le type de roches que les eaux ont traversé, puisque chaque minéral a une signature qui lui est propre.

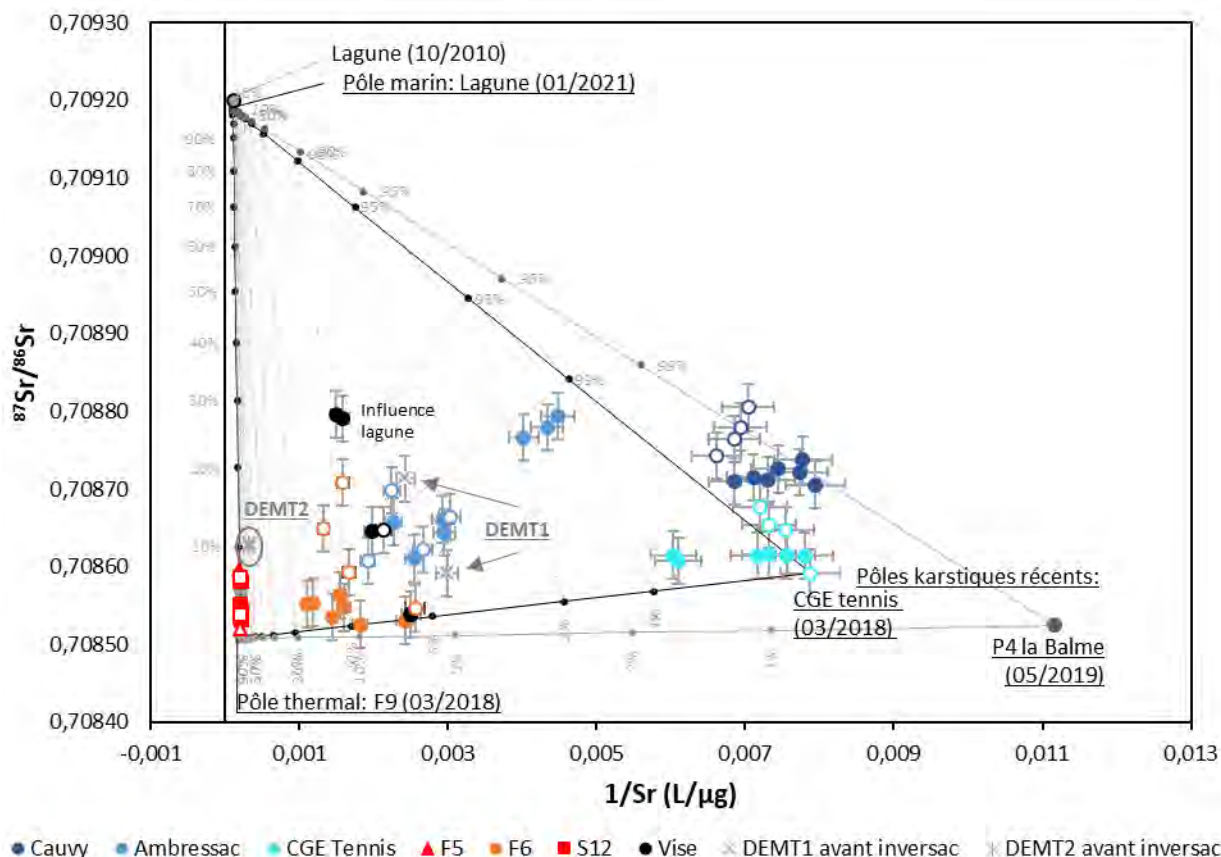


Figure 12: Rapport isotopique $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en fonction de l'inverse de la concentration en Sr des échantillons de 2018-2020. Les barres d'erreurs sont de 0,00003 pour le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et de 5 % pour les concentrations en Sr. Les figurés vides correspondent aux données spatiales (2018-2019) et les figurés pleins aux campagnes mensuelles avant l'inversac (2020).

Les nouveaux résultats sont dans les mêmes tendances que celles observées entre 2018 et 2019. L'ensemble des points peuvent s'interpréter par des mélanges entre un pôle thermal ici représenté par F9 (cf BRGM/RP-71281-FR), un pôle marin ici représenté par les eaux de la lagune et un pôle karstique (CGE tennis et/ou P4 la Balme). Les eaux thermales et les eaux karstiques ont des signatures en $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ similaires, caractéristiques des réservoirs karstiques. Ainsi, l'ensemble de ces eaux circulent dans des réservoirs carbonatés.

Les nouveaux résultats ne mettent pas en évidence de variations temporelles significatives (voir figure en annexe A3.8 et A3.9) des signatures isotopiques $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des eaux thermales (F5 et S12) ni des eaux karstiques (CGE tennis et Cauvy). Cela signifie donc que les signatures isotopiques de ces eaux sont globalement lissées durant l'année, indiquant les valeurs moyennes

des eaux karstiques et thermales. Dans le cas de CGE tennis, des variations de concentration en Sr sont toutefois visible avec les valeurs les plus hautes mesurées en mars et novembre 2020. Ces variations ne semblent pas être corrélées au niveau piézométrique de l'ouvrage (annexe A3.8 et A3.9).

Les signatures $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des eaux d'Ambressac sont beaucoup plus variables dans le temps. Les échantillons de janvier, février et juin 2020 ont les concentrations les plus faible et les rapports isotopiques les plus haut. La lecture graphique de la Figure 12 montre que c'est eaux sont composées essentiellement d'eaux karstiques (> 99% avec le pôle karstique représenté par CGE Tennis). Ces valeurs sont associées à des périodes de décrues (janvier et février). A partir de juillet 2020, les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et les concentrations en Sr restent globalement constants (dans les barres d'erreurs). Les proportions de mélanges des eaux d'Ambressac avec les eaux thermales sont à partir de juillet plus importantes (environ 5%) ce qui est cohérent avec les résultats précédemment présentés avec les concentrations en élément majeurs (Figure 7). Ainsi le mélange avec les eaux thermales provoque une augmentation des concentrations en Sr et une diminution des rapports isotopiques $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. La relation entre les signatures en Sr (et donc les proportions de mélanges avec les eaux thermales) et les niveaux piézométriques n'est pas évidente, comme cela a été montré dans la partie 3.1.3 ci-dessus.

Enfin, les eaux de F6 ont des signatures en Sr proche des eaux de la Vise et d'Ambressac. Les eaux alimentant cet ouvrage sont donc des mélanges en proportions variables d'eaux thermales et d'eaux karstiques provenant aussi bien de la Gardiole (type Ambressac) que du Causse d'Aumelas (type de CGE Tennis).

3.3.2. Isotopes du Lithium

Pour compléter la base de données en isotopies du lithium ($\delta^7\text{Li}$), sept nouveaux échantillons des campagnes mensuelles ont été analysés (Figure 14). Dus à des contraintes techniques et de temps, il n'a pas été possible d'analyser en lithium tous les échantillons prélevés durant la période du projet DemEaux Thau. Le tableau suivant présente les concentrations de tous les échantillons prélevés, les analyses effectuées en isotopie du lithium (en vert) et présentées dans le rapport L5a (BRGM/RP-71281-FR) et les nouveaux résultats présentés dans ce travail (en jaune). Afin de pouvoir interpréter au mieux les données, les échantillons sélectionnés pour les analyses en isotopie du lithium ont été choisis pour correspondre aux échantillons avec les plus fortes variations de concentrations en lithium, sur la base de leurs concentrations. Pour les eaux de Ambressac, Cauvy, F5, F6, S12 et la Vise, il a généralement été choisi d'analyser les échantillons ayant les concentrations mesurées les plus basses (et l'inverse pour CGE Tennis). Afin d'interpréter au mieux les signatures des forages de la plateforme scientifique expérimentale (cf partie 5.1.4), la Vise a été mesurée sur la même période.

Tableau 7 : Récapitulatif des analyses réalisées en isotopie du lithium

Date	Ambressac	Cauvy	CGE - Tennis	F5	F6	S12	Vise	DEM-T1.2 t0+24h	DEM-T2.2 t0+4h
28/03/2018	8,0	2,6	1,4	161	18	161	-	-	-
30/08/2018	6,9	2,6	1,4	165	17	177	-	-	-
23/05/2019	6,0	2,5	1,5	156	7	153	-	-	-
15/07/2019	7,4	-	-	-	-	-	-	-	-
24/09/2019	-	-	-	-	-	-	8	-	-
12/12/2019	7,8	2,3	1,3	170	13	155	9	-	-
22/01/2020	4,7	2,3	-	147	12	146	34	-	-
26/02/2020	4,8	2,6	1,6	146	9	146	12	-	-
28/05/2020	-	-	1,6	-	22	-	-	11,7	-
04/06/2020	5,0	2,6	-	157	17	161	8	-	94,7
07/07/2020	7,1	2,3	1,4	154	16	151	11	-	-
03/09/2020	6,3	2,7	1,4	171	18	157	13	-	-
08/10/2020	5,5	2,0	1,4	145	28	148	15	-	-
12/11/2020	9,1	2,8	1,9	159	17	176	39	-	-

Pour rappel, les données en lithium des campagnes mensuelles ont été interprétées précédemment dans le rapport L5a (cf partie 5.7.3 du rapport BRGM/RP-71281-FR) de la manière suivante :

- Les concentrations en lithium des eaux karstiques suivent la droite de dilution des eaux marines. Ainsi, la présence de lithium dans ces eaux s'explique principalement par un mélange avec des eaux marines.
- Les eaux thermales ont un excès de lithium. Cet excès ne peut pas s'expliquer par des interactions eau-roche plus intense avec la roche encaissante puisque les roches carbonatées sont connues pour avoir des concentrations en Li négligeables. La signature théorique en $\delta^7\text{Li}$ de cet apport (entre -5 et 1 ‰) est représentative des roches granitiques. Il a ainsi été proposé que l'excès de lithium des eaux thermales provient d'un flux d'eau du socle granitique.
- La quasi-totalité des eaux peut s'expliquer par un mélange à trois pôles avec un pôle marin, un pôle thermal et un pôle karstique.

Les nouveaux résultats suivent les mêmes tendances que celles observées en 2018 (Rapport L5a, BRGM/RP-71281-FR). Tous les échantillons moins concentrés en [Li] tendent vers le pôle karstique représenté par CGE tennis. Ceci met en évidence, comme pour le strontium, que le mélange avec les eaux thermales provoque une augmentation des concentrations en Li, le $\delta^7\text{Li}$ n'est quant à lui que peu variable (variations dans les barres d'erreur). Dans le cas de CGE Tennis, prélevé lorsque les niveaux piézométriques étaient les plus bas, la concentration en Li est la plus élevée. Dans son cas, on suppose que l'échantillon est le plus représentatif du milieu où les eaux circulent : aquifère carbonaté captif sous couverture Miocène.

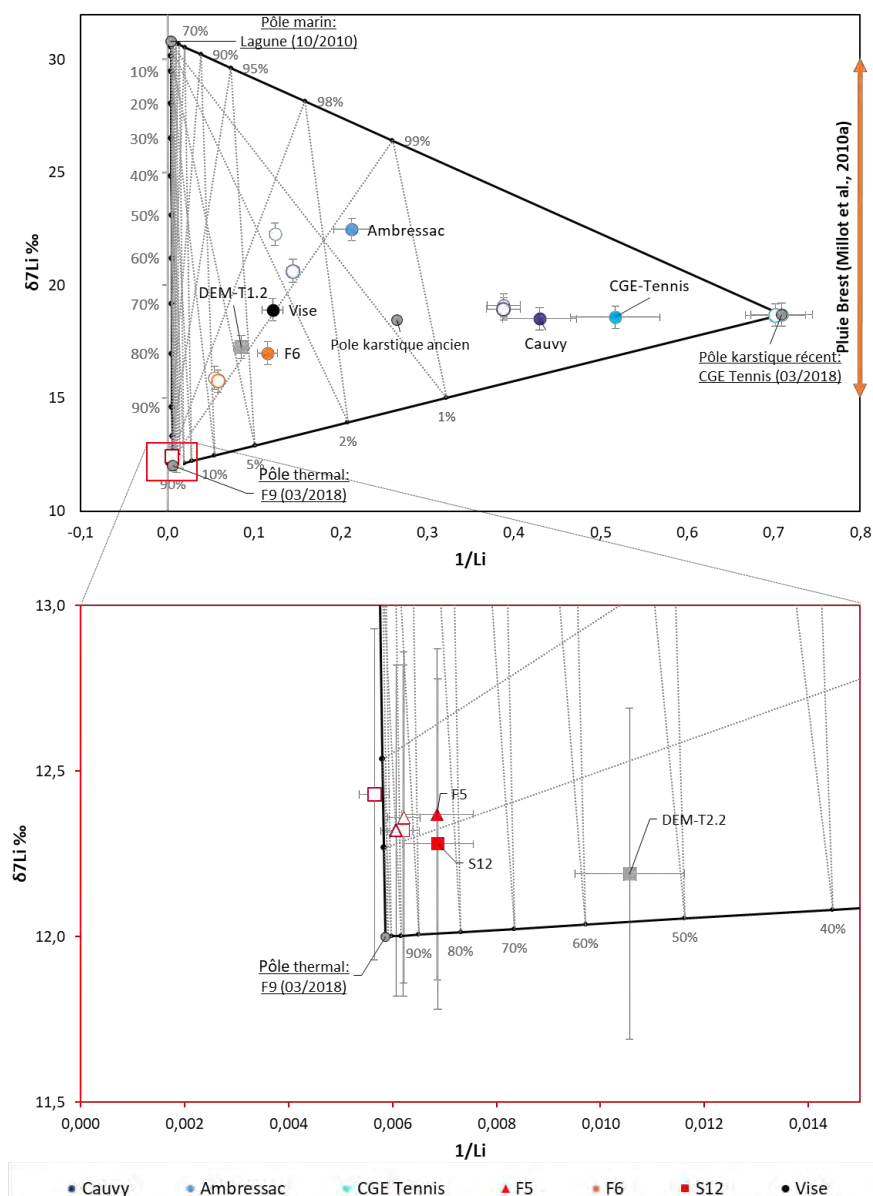


Figure 13: $\delta^7\text{Li}$ en fonction de l'inverse de la concentration en Li des échantillons de 2018 (figurés vides) et de 2020 (figurés pleins). Les proportions de mélange ont été estimées pour un mélange à trois pôles (thermal, karstique et marin). Les barres d'erreurs sont de 0,5 ‰ pour le $\delta^7\text{Li}$ et 5 % pour les concentrations en B.

3.3.3. Isotopes du Bore

Les valeurs isotopiques en $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$ sont données en $\delta^{11}\text{B}$, c'est-à-dire le rapport de l'échantillon comparé au standard de référence, ici le Standard NIST SRM 951a. Les nouvelles données des campagnes mensuelles sont reportées en annexe 2 et illustrées en Figure 14 et Figure 15. Nous avons été confronté à des problèmes de conservation ainsi que des problèmes analytiques, seuls 8 échantillons sur les 55 échantillons collectés sont reportés.

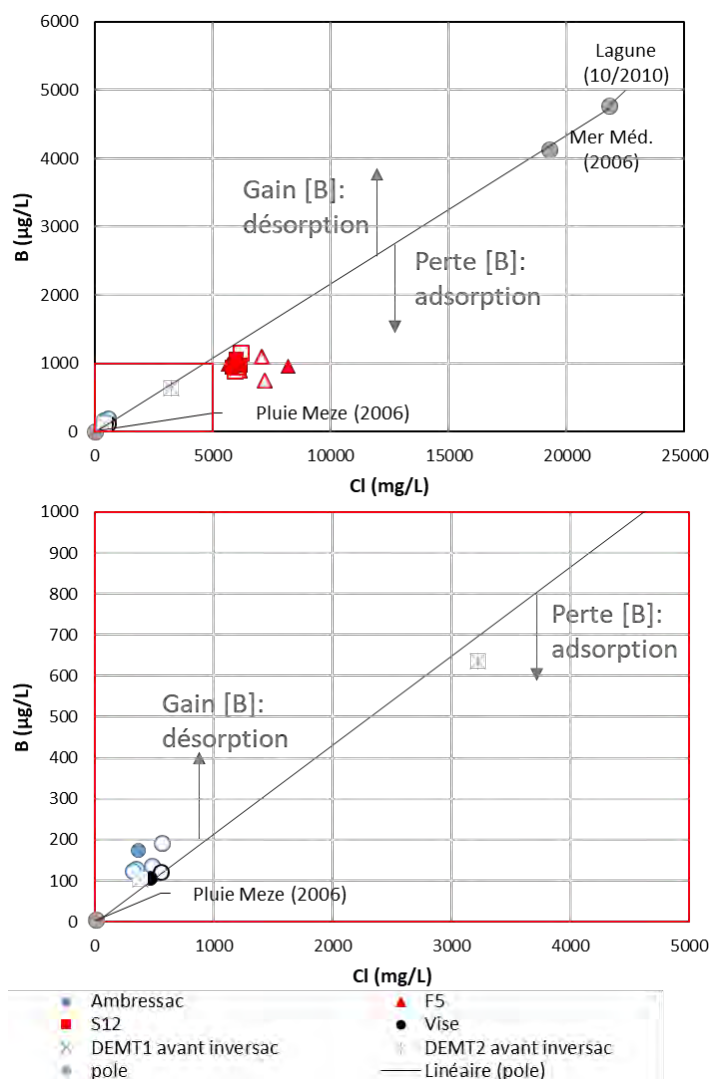


Figure 14: Diagramme des concentrations en B (μg/L) en fonction des concentrations en Cl (mg/L) (en haut) et zoom sur les eaux karstiques (en bas). Les figurés pleins sont ceux des nouvelles campagnes mensuelles, les figurés vide ceux des campagnes spatiales (2018-2019). La droite représente la droite de dilution de l'eau de mer.

La concentration du bore dans les eaux du site est essentiellement liée à des apports des eaux d'origine marine et/ou de pluie pour les eaux karstiques froides. Ainsi, les concentrations en B et Cl des eaux devraient être sur la droite de dissolution de l'eau de mer. La Figure 14 représentant le B en fonction de Cl montre que certains prélèvements sont situés au-dessus (cas de Ambressac) ou au-dessous (F5 et S12 Ecole) de la droite de dilution des eaux de mer. Les

nouveaux résultats (figurés pleins sur la Figure 14) sont dans les mêmes gammes de valeurs précédentes (2018-2019).

Les résultats du $\delta^{11}\text{B}$ sont présentés en fonction des concentrations en bore et l'inverse des concentrations en bore (Figure 15). Les nouveaux résultats confirment les précédentes interprétations (rapport L5a BRGM/RP-71281-FR).

Les eaux thermales sont enrichies en ^{11}B (et donc en $\delta^{11}\text{B}$) et appauvries en B par rapport à la valeur théorique estimée sur la base d'un simple mélange de 70% d'eau karstique et 30% d'eau marine. Ces caractéristiques correspondent à un processus d'adsorption du bore des eaux thermales probablement sur des argiles et/ou de la matière organique. Ainsi le bore et en particulier le ^{10}B est piégé dans des sédiments argileux et/ou la matière organique, provoquant un fractionnement isotopique important qui privilégie l'isotope léger dans les phases solides et donc laisse évoluer la solution vers des valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ de plus en plus élevées. Ainsi, plus le processus sera abouti, plus les valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ seront hautes. Au vu des connaissances géologiques du site, il peut être proposé que ces processus d'adsorption du bore se font soit (1) au toit du Jurassique au contact avec la formation argilo-silteuse du Miocène soit (2) sur la première centaine de mètre de la formation Jurassique, dans la partie karstifiée du réservoir plus ou moins comblée d'alterites d'origine Miocène. En effet, le Jurassique a connu des phénomènes forts de karstification avant d'être recouvert par les sédiments du Miocène. Les cavités sont donc partiellement ou entièrement remplies de sédiment.

Les eaux de la source d'Ambressac ont des caractéristiques intermédiaires sur les différentes figures entre les eaux thermales et les eaux karstiques (ici CGE tennis), mettant en évidence que ces eaux proviennent essentiellement d'un mélange entre les eaux thermales et les eaux karstiques. Ces eaux ont un excès de B par rapport au chlorure et des $\delta^{11}\text{B}$ inférieurs aux eaux de mer, typique des eaux karstiques du site. Ensemble, ces caractéristiques pourraient s'expliquer par des processus de désorption du Bore, provoquant une augmentation de la concentration du bore et en particulier du ^{10}B (et donc une diminution du $\delta^{11}\text{B}$), mais aussi en parallèle à la dissolution des roches carbonatées. Compte tenu des informations apportées par les traceurs des contaminations (cf § 3.2) et de la position des points d'Ambressac dans les diagrammes (Figure 15), on ne peut pas exclure également une contamination en bore par des eaux usées (signature appauvrie en $\delta^{11}\text{B}$ autour de 0, Widory et al, 2005).

Les processus d'interaction eau-roche et/ou de contamination par les eaux usées affectent les signatures et les concentrations en bore, dans ce contexte, ce traceur ne peut pas être utilisées pour quantifier les proportions de mélange des différentes composantes (pôle karst, Mer, pôle thermal) comme pour le strontium.

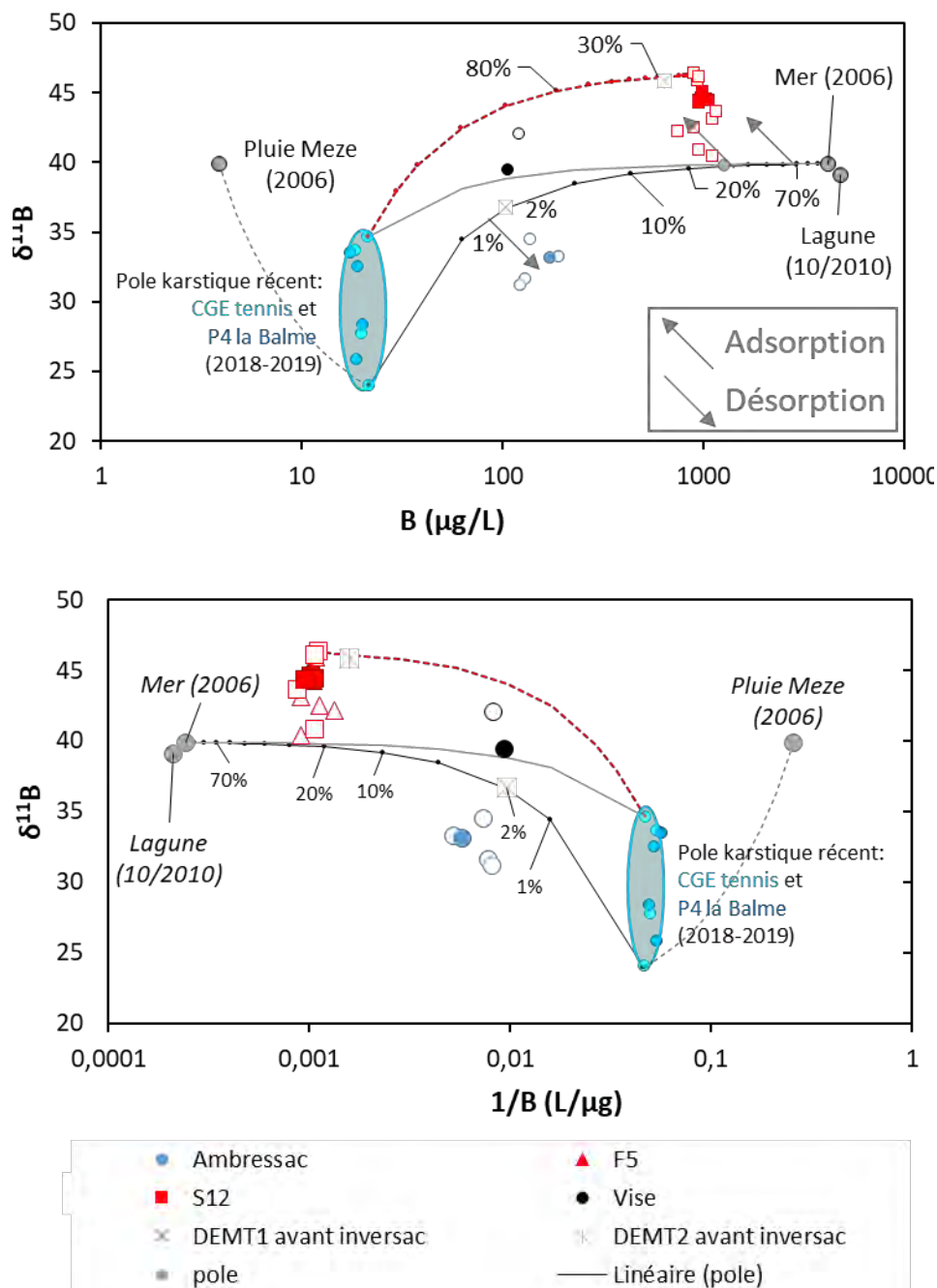


Figure 15: Diagramme du $\delta^{11}\text{B}$ en fonction de la concentration en B (en haut) et de l'inverse de la concentration du bore (en bas). Les figurés pleins sont ceux des nouvelles campagnes mensuelles, les figurés vide ceux des camapgnes spatiales (2018-2019). Sur ces figures les courbes noires représentent un mélange entre l'eau de mer et CGE Tennis bas, les courbes grises un mélange entre l'eau de mer et CGE Tennis haut, les courbes en gris pointillées un mélange entre CGE Tennis bas et l'eau de pluie et la courbe rouge un mélange entre les eaux thermales et CGE Tennis haut. L'impact théorique des processus d'adsorption et de désorption y est aussi représenté.

3.4. DATATIONS

3.4.1. Gaz anthropiques

Les données des concentrations en CFC et SF₆ mesurées en pmol/L puis converties en pptv sont reportées en annexe 2, et illustrées en Figure 16 et Figure 17. La conversion des données en pptv est très sensible à la température de recharge avec une erreur estimée de 5 %/°C et, dans le cas du SF₆ aussi à l'excès d'air (EA). Les gaz dissous ne nous permettant pas d'estimer les températures de recharge (voir Ranchoux et al., BRGM/RP-71281-FR pour plus d'informations, et les nouveaux résultats en annexe A3.10) la température moyenne du bassin, estimée à 15 °C, a été utilisée pour les eaux karstiques. Pour les eaux plus profondes et plus anciennes, une température de 13 °C a été appliquée (voir Ranchoux et al., BRGM/RP-71281-FR pour plus d'information). Une correction de l'EA a été appliquée aux teneurs en SF₆, sauf pour les eaux ayant un EA négatif (cf ci-dessus). Enfin, une altitude de recharge de 250 m a été attribuée à toutes les eaux du bassin.

Les gaz anthropiques CFC-SF₆ sont généralement utilisés comme outils pour proposer des schémas de circulations des eaux et ainsi estimer les temps de résidences moyens des échantillons (cf BRGM/RP-71281-FR pour plus d'informations). Pour cela, les concentrations en gaz sont reportés deux à deux et sont comparés aux différents modèles de circulations des eaux (courbes sur Figure 16). Les nouveaux résultats des campagnes spatiales, illustrés sur la Figure 16, mettent en évidence que la quasi-totalité des points de prélèvements ont des concentrations bien supérieures aux différentes courbes. Cela signifie que les valeurs atmosphériques mesurées ne peuvent pas expliquer ces résultats, et qu'il existe donc des contaminations localisées sur la zone d'étude. Les études scientifiques ont montré que les zones périurbaines et les sols peuvent être contaminés par des activités industrielles, des fuites de décharges, à l'agriculture pour les CFC et les équipements d'alimentation haute tension, les fonderies de Mg et Al et les décharges pour le SF₆. Ces contaminations ne nous permettent pas d'estimer des temps de résidence, ni de proposer des schémas de circulations des eaux. Toutefois, les pollutions peuvent tracer les chemins des circulations des eaux, et informer sur la zone de recharge (Causse d'Aumelas ou Massif de la Gardiole).

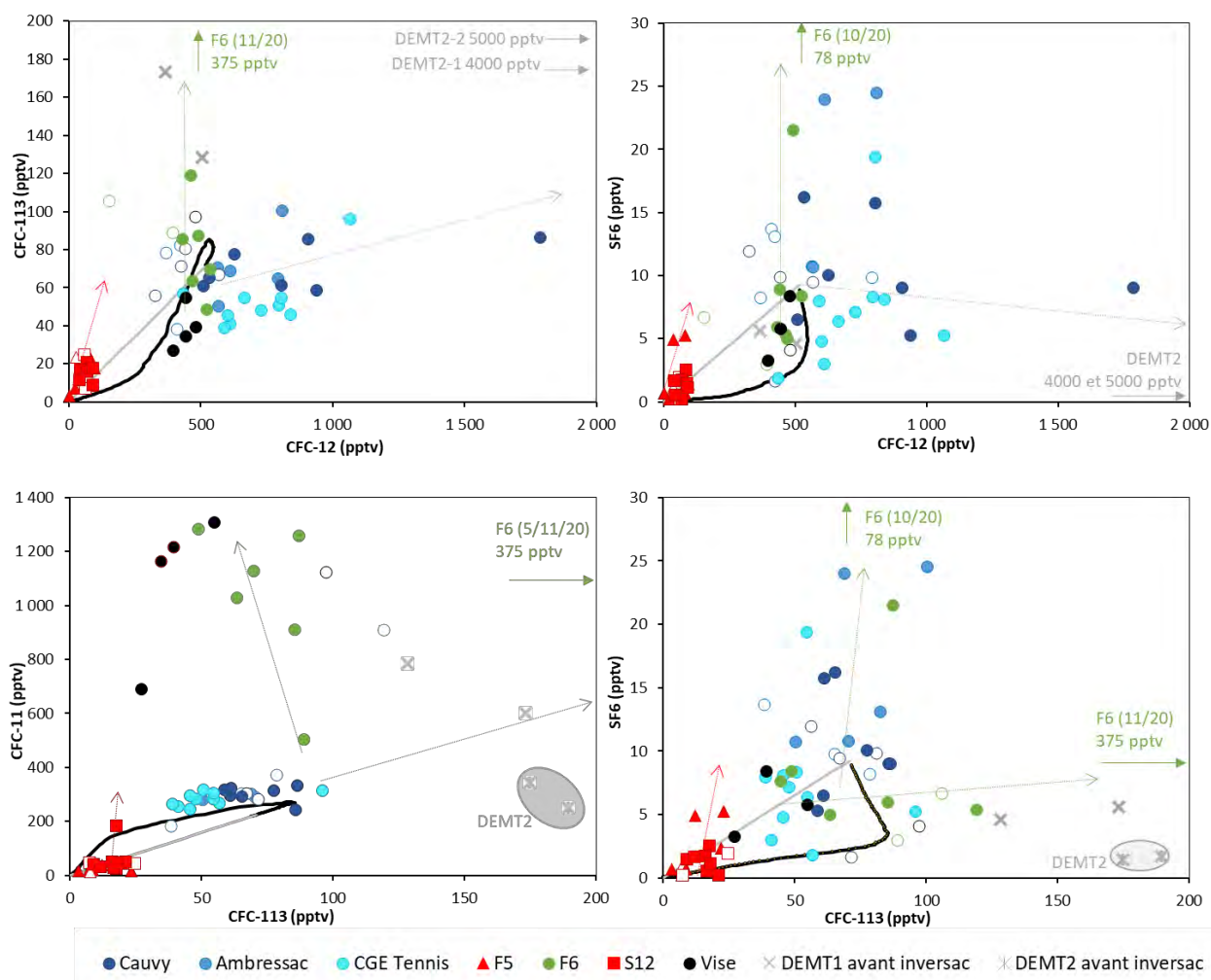


Figure 16: Représentation graphique des résultats de SF6, CFC-11, CFC-12 et CFC-113 des eaux étudiées entre 2018 et 2020. Les figurés vides correspondent aux données spatiales (2018-2019) et les figurés pleins aux campagnes mensuelles avant l'inversac (2020).

Au moins trois types de contamination sont visible sur la zone d'étude. La première, portée par le forage F6 (valeurs les plus hautes), contamine les eaux principalement en CFC-113 et en CFC-11 (pas de contamination en CFC-12). Lors de période particulière (5/11/20, très basse eaux) la contamination en CFC-113 est beaucoup plus important (375 pptv) sans impacter le CFC-11. Cela semble indiquer que ces deux contaminations, bien que contribuant à l'explication des signatures des eaux du forage F6, ne proviennent pas de la même source de contamination. Cette contamination touche la quasi-totalité des points de F6 mais aussi à plus faible échelle les eaux karstiques récentes (Ambressac et Cauvy) et les forages thermaux S12 et F5.

La deuxième contamination est aussi portée par le F6, caractérisé par des valeurs hautes en SF6 et des valeurs similaires en CFC-11 et 113 que précédemment. Cette apport de SF6 est mesuré en juillet et en octobre 2020. L'apport en SF6 est aussi noté dans certains ouvrages karstiques (Ambressac, Cauvy et CGE tennis) ainsi que dans les forages thermaux S12 et F5.

Tous les ouvrages échantillonnées dans le karst de la presqu'île présentent des concentrations en gaz dissous bien supérieures aux valeurs atmosphériques ce qui indique que les eaux souterraines sont contaminées par au moins 2 sources locales de pollution en gaz anthropique. Ces sources de pollution sont à priori toutes localisées sur

l'impluvium karstique du massif de la Gardiole puisque les résultats de la source d'Issanka (cf. L5a, BRGM/RP-71281-FR) rattachée au compartiment amont (rechargé par le Causse d'Aumelas et la montagne de la Moure) ne présente pas d'indice de contamination locale de pollution en gaz anthropique.

Enfin la troisième contamination est portée par le DEMENT2, et se caractérise par un apport important de CFC-12 (de 3900 à 6900 pptv). L'ouvrage DEMENT2 permet d'échantillonner les eaux des horizons les plus perméables de l'aquitard Miocène sus-jacent au carbonate Jurassique. Cet excès est aussi visible dans tous les ouvrages karstiques (Ambressac, Cauvy et CGE tennis) mais ne semble pas (ou peu) impacté la Vise, F6, DEMENT1 ni les ouvrages thermaux. Les résultats sur les ouvrages CGE Tennis, Cauvy et Ambressac pourraient laisser suggérer l'existence de mélange entre les formations aquifères.

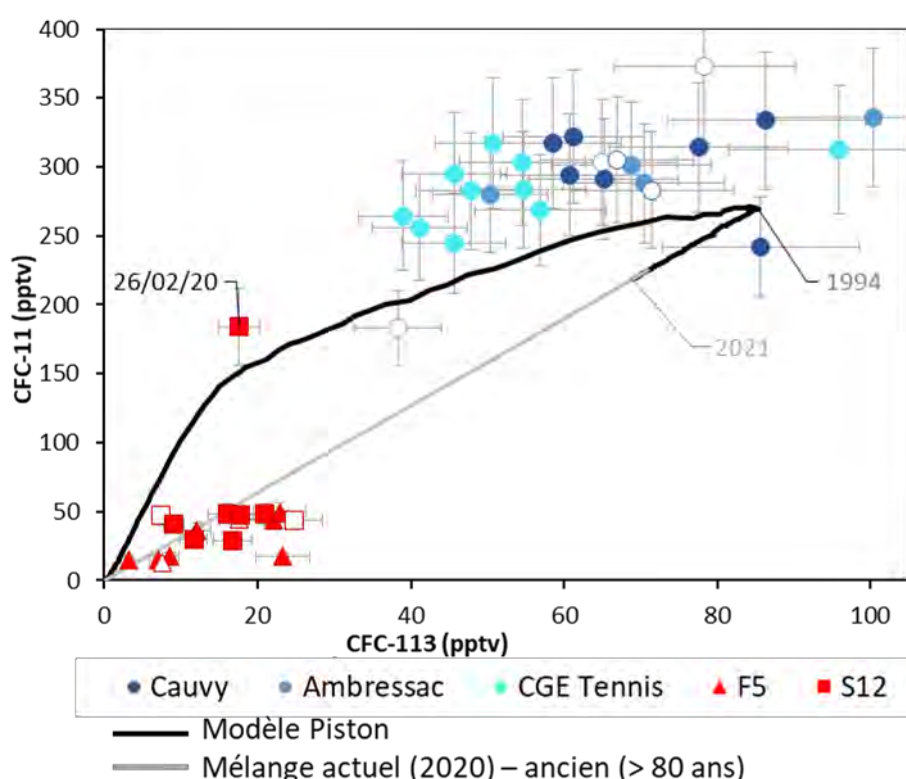


Figure 17: Représentation graphique des résultats du CFC-11 en fonction du CFC-113 de F5, S12, Cauvy, Ambressac et CGE Tennis entre 2018 et 2021. Les figurés vides correspondent aux données spatiales (2018-2019) et les figurés pleins aux campagnes mensuelles avant l'inversac (2020). Une barre d'erreur de 15 % a été appliquée correspondant à 3°C de variation dans la conversion des résultats en pptv.

Sur la Figure 17, le report des concentrations atmosphériques permet de tracer la courbe noire du modèle piston, la droite grise représente la droite de mélange théorique calculée entre une eau récente (infiltrée entre 1994 et 2020) et une eau ancienne dépourvue de CFC (mélange binaire). Les ouvrages F5 et S12 ne semblent pas être contaminés en CFC-11 et CFC-113 (à l'exception du point S12 le 26/02/20) contrairement aux eaux karstiques (Cauvy, Ambressac, CGE Tennis). La position des points des ouvrages F5 et S12 dans la Figure 17 suggère l'existence d'un phénomène de mélange entre une eau ancienne (dépourvu de CFC) et une eau récente. Selon le pôle récent considéré (1994 ou 2020), les proportions de mélange entre les

eaux anciennes et récentes peuvent être estimées (Tableau 8). Les proportions d'eau actuelle (2020) varient entre 7 et 20% pour le forage F5 et entre 13 et 22 % pour S12 mettant en évidence une forte variabilité saisonnière. Ces résultats sont toutefois à prendre avec prudence puisque l'hypothèse ici est que les eaux récentes qui contribuent au mélange ne sont pas polluées par une contamination anthropique ponctuelle, or les résultats des eaux karstiques démontrent que cette hypothèse n'est pas vérifiée.

Tableau 8: Proportion d'eau récente (2020 ou 1994) et ancienne, antérieur à 1940 des eaux thermales (F5 et S12).

Echantillon	Date	Proportion d'eau ancienne				Proportion d'eau récente	
		2020		1994		2020	1994
		CFC-11	CFC-113	CFC-11	CFC-113	CFC-11	CFC-11
F5	26/03/2018	92%	66%	94%	72%	8%	6%
	28/08/2018	94%	89%	95%	91%	6%	5%
	22/01/2020	80%	74%	84%	79%	20%	16%
	26/02/2020	80%	68%	84%	74%	20%	16%
	04/06/2020	93%	90%	94%	92%	7%	6%
	07/07/2020	93%	95%	95%	96%	7%	5%
	03/09/2020	92%	88%	93%	90%	8%	7%
	08/10/2020	77%	67%	82%	73%	23%	18%
	05/11/2020	83%	82%	87%	86%	17%	13%
S12 Ecole	28/03/2018	80%	64%	84%	71%	20%	16%
	30/08/2018	78%	89%	83%	91%	22%	17%
	22/01/2020	78%	70%	82%	75%	22%	18%
	26/02/2020	-	74%	-	79%	-	-
	04/06/2020	87%	76%	89%	80%	13%	11%
	07/07/2020	78%	77%	82%	81%	22%	18%
	03/09/2020	81%	87%	85%	89%	19%	15%
	08/10/2020	78%	74%	82%	79%	22%	18%
	12/11/2020	86%	83%	89%	86%	14%	11%

3.4.2. Hélium

Les âges Hélium sont estimés avec la méthode présentée dans le livrable L5a (BRGM/RP-71281-FR). En résumé, les taux de production ont été estimés à partir des équations de Torgersen (1980) en négligeant les incertitudes liées au phénomène de diffusion entre la matrice et les fractures. Les concentrations en U et Th, la densité et la porosité de la roche ont été estimés à partir de nos connaissances du site (voir BRGM/RP-71281-FR pour plus d'informations). Les paramètres utilisés sont présentés dans le Tableau 9. Pour les ouvrages impactés par un apport de Li, que nous interprétons comme un apport d'un flux de socle (cf partie 3.3.2 et livrable L5a BRGM/RP-71281-FR), une correction doit être faite. Pour cela, il est nécessaire d'estimer la proportion de Li en excès par rapport à la droite de dissolution des eaux de mers. Pour rappel, une distinction est faite entre les eaux circulant principalement dans les sédiments Miocènes (F6) des eaux circulant dans le calcaire Jurassique (F5, S12, Ambressac, Cauvy et CGE tennis).

Tableau 9: Paramètres utilisés et leurs incertitudes pour le calcul du taux de production d'hélium

Paramètres	Symbole	Valeur(s)	Unité	Incertitudes
Densité de la roches	ρ	2,6	g/cm ³	5%
Facteur de mise en solution	ΔHe	1	/	/
Porosité	θ	entre 0,7 et 1,3 0.5 pour Pézenas	%	5%
Concentration uranium Jurassique (Miocène) [U]		0,74 (2,12)	ppm	15%
Concentration thorium Jurassique (Miocène) [Th]		0,84 (2,01)	ppm	3%
Concentration hélium	[He]	calculé	cm ³ STP/l	5%

Les nouveaux résultats des âges Hélium des eaux thermales et F6 sont présentés en Figure 18. Pour rappel, les teneurs en lithium des eaux échantillonnées dans ces ouvrages témoignent de l'existence d'une contribution d'eau profonde provenant du socle granitique et/ou métamorphique sous-jacent. Ces apports, estimés par le Li et illustré en Figure 18 (courbe grise), sont utilisés pour corriger l'estimation des âges Hélium. Ainsi, l'âge Hélium obtenu est représentatif du temps de circulation des eaux dans le système carbonaté Jurassique. En considérant une porosité efficace de 0,5 % (cf. BRGM/RP-71281-FR) qui explique le mieux les résultats hélium et ³⁶Cl de F5 et S12, l'âge Hélium des eaux de F5 et S12 serait de l'ordre de 12 000 et 20 000 ans.

La comparaison de âges Hélium avec les concentrations en CFC (partie 3.4.1) montre que les eaux présentant l'âge Hélium le plus faible présentent des concentrations en CFC les plus faibles. Ceci est cohérent puisqu'une contribution d'eau récente diminue le temps de résidence moyen des eaux. Les eaux du forage F6 présentent des âges Hélium beaucoup plus faibles, de l'ordre de 2 000 ± 1000 ans.

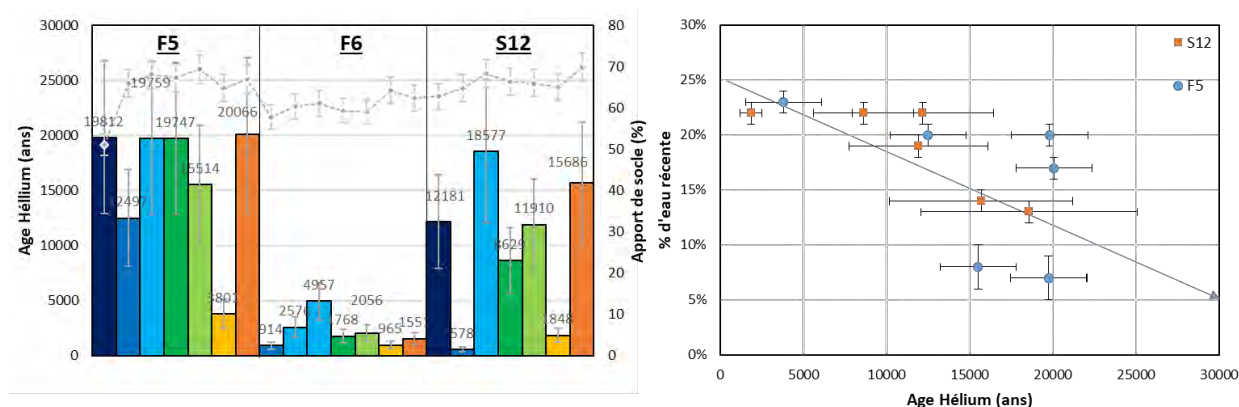


Figure 18: Age hélium des eaux thermales de F5 et S12 et F6 (à gauche) et age hélium et en fonction de la proportion d'eau récente estimée par les concentrations en CFC (à droite) pour des porosités efficaces du réservoir karstique de 0,5%. Les eaux thermales sont considérés comme circulant dans le réservoir Jurassique, F6 dans le Miocène.

Les âges Hélium des eaux karstiques (Ambressac, Cauvy et CGE tennis) sont illustrés en Figure 19 en considérant une porosité efficace du réservoir karstique de 1 %, plus représentative de la porosité dans les secteurs libres de l'aquifère dans la zone de la presqu'île de Balaruc (cf. BRGM/RP-71281-FR). Les âges Hélium sont de l'ordre 1000 ans soit des valeurs bien plus élevées que l'âge apparent suggéré par les fortes concentrations des gaz anthropiques (cf 3.4.1).

Dans le cas de l'ouvrage CGE-Tennis, ces résultats surprenants peuvent être liées aux fortes concentrations en ²²²Rn (cf annexe A3.1 et BRGM/RP-71281-FR). L'origine des teneurs importante en He de ces points d'eaux pourrait donc s'expliquer par des échanges avec la

formation Miocène notamment au niveau de l'interface Jurassique-Miocène. En effet, le taux de production terrigène au sein de la formation Miocène est supérieur à celle des carbonates en raison de l'importance des minéraux argileux-sableux du Miocène (BRGM/RP-71281-FR). Les échanges d'eau et de gaz à l'interface Jurassique-Miocène produirait donc un vieillissement de l'âge Hélium des eaux karstiques.

Dans le cas d'Ambressac et dans une moindre mesure à Cauvy, les fortes concentrations en He (et donc des âges apparents hauts) pourraient traduire la mobilisation par effet piston d'une eau ancienne qui a eu le temps de se charger en hélium d'origine terrigène. L'existence du mécanisme d'effet piston sur la source de Cauvy en période de hautes eaux a été démontré par Pinault et al., 2004, ce phénomène se traduisant par une légère augmentation d'une contribution d'eau d'origine thermique.

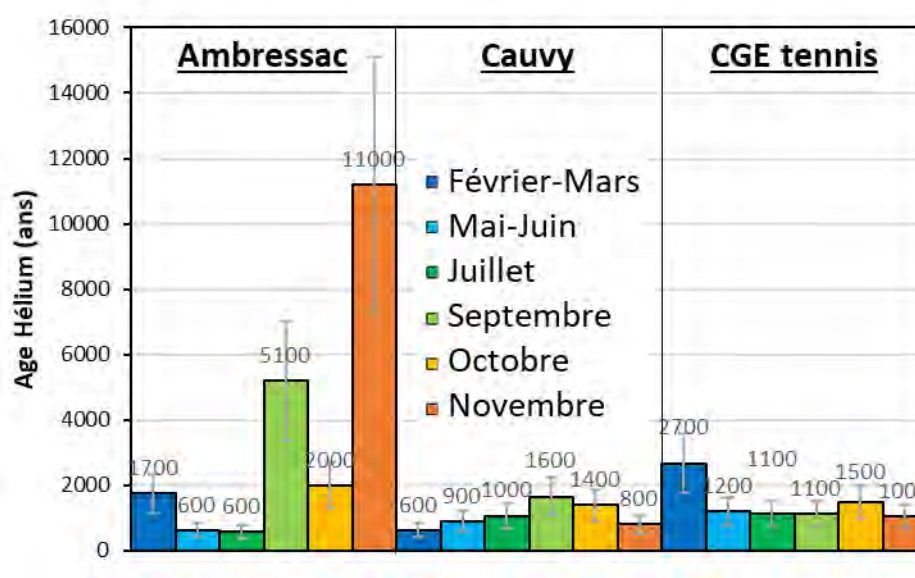


Figure 19: Age hélium estimé pour les eaux karstiques en considérant une porosité efficace du réservoir karstique de 1 %

4. Résultats de l'inversac (2020-2021)

Le déclenchement d'un inversac à la source de la Vise le 28 Nov. 2020 (fin le 14 mars 2022) au cours du projet nous a amené à repenser le programme prévisionnel des suivis et à mobiliser des ressources pour effectuer un suivi précis du phénomène. Les prélèvements ainsi réalisés permettent d'avoir des informations sur (1) la phase de transition observée en début de phénomène et donc sur la réorganisation des écoulements, puis dans un second temps, sur (2) l'état géochimique de l'hydrosystème au cours de la phase pseudo-stationnaire d'équilibre qui s'observe au cours de l'inversac. Les résultats et/ou figures complémentaires non abordés dans cette partie sont présentés en annexe 4 (comme par exemple les résultats du radon 222 en A3.1 et des REE en A3.2).

4.1. PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES ET PARAMETRES CHIMIQUES

4.1.1. Evolution des profils de conductivité électrique mesuré en continu

Les mesures en continu des paramètres physico-chimiques des ouvrages permettent de visualiser précisément l'impact de l'inversac sur ces paramètres (l'évolution de la conductivité électrique est illustrée en Figure 20. L'inversac a entraîné l'augmentation de la conductivité électrique des ouvrages et sources suivies (F6, F5, source historique (S12), Cauvy et Ambressac) avec une augmentation particulièrement marquée pour le forage F6 et la source S12 représentatifs de mélanges entre l'eau thermale et l'eau karstique (Figure 20).

A partir de Février 2021, l'augmentation de la conductivité électrique est moins marquée et on observe même une chute de conductivité à la source S12, témoignant d'une réorganisation des écoulements de la surface vers la profondeur compte tenu d'une densité plus importante des eaux de la lagune. On remarque également qu'au tout début de l'inversac, la conductivité électrique chute à la source S12. Cette chute s'explique par une contribution momentanément plus importante d'eau douce karstique dans le mélange ; l'eau douce ne pouvant plus sortir par l'exutoire de la Vise.

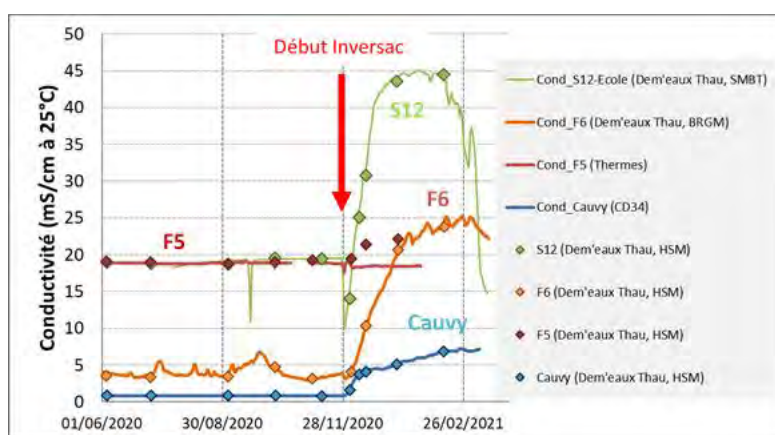


Figure 20: Evolution temporelle de la conductivité électrique montrant l'impact de l'inversac sur la presqu'île de Balaruc.

4.1.2. Diagramme de Piper : description des faciès chimiques

Les principaux éléments majeurs (cations et anions) sont représentés dans le diagramme de Piper (Figure 21). La majorité des eaux échantillonnées (Ambressac, Cauvy, F4, F5, F6, F9, S12 école et la Vise) semblent se rapprocher des eaux de la lagune (en noir sur la Figure 21). Ceci est particulièrement visible pour Cauvy, dont les signatures chimiques évoluent depuis un faciès bi-carbonatées calciques à magnésienne vers un faciès chlorurée sodique et potassique (flèche bleue foncée sur la Figure 21).

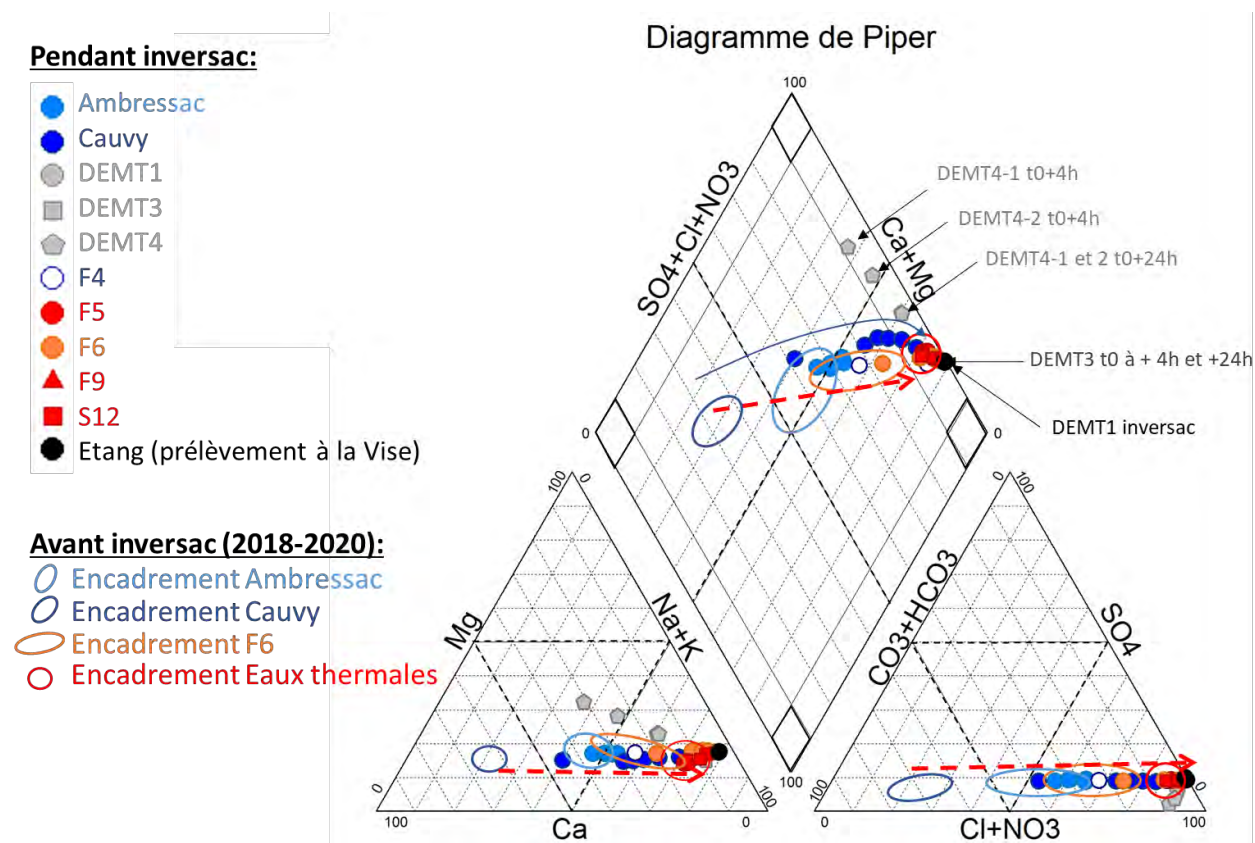


Figure 21: Diagramme de Piper des eaux échantillonnées pendant l'inversac.

4.1.3. Evidence de mélange avec les eaux marines

La totalité des eaux échantillonnées pour cette étude, à savoir les campagnes spatiales (2018-2019), mensuelles (2020) et celles liées à l'inversac (2020-2021) s'alignent dans les diagrammes binaires Na/Cl (Figure 22a), et K/Cl Mg/Cl, SO₄/Cl (non représentés) sur la droite de dilution de l'eau de mer, entre un pôle d'eaux de pluies locales (Mèze, environ 6 km de l'exutoire de la Vise) et un pôle marin (eau de mer et/ou eau de la lagune de Thau). Ceci confirme que les éléments cités ci dessus proviennent seulement d'un apport d'eau de mer (et non d'interaction eau roche). Ceci est aussi clairement visible dans les diagrammes des isotopes stables de l'eau $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ (Figure 22b).

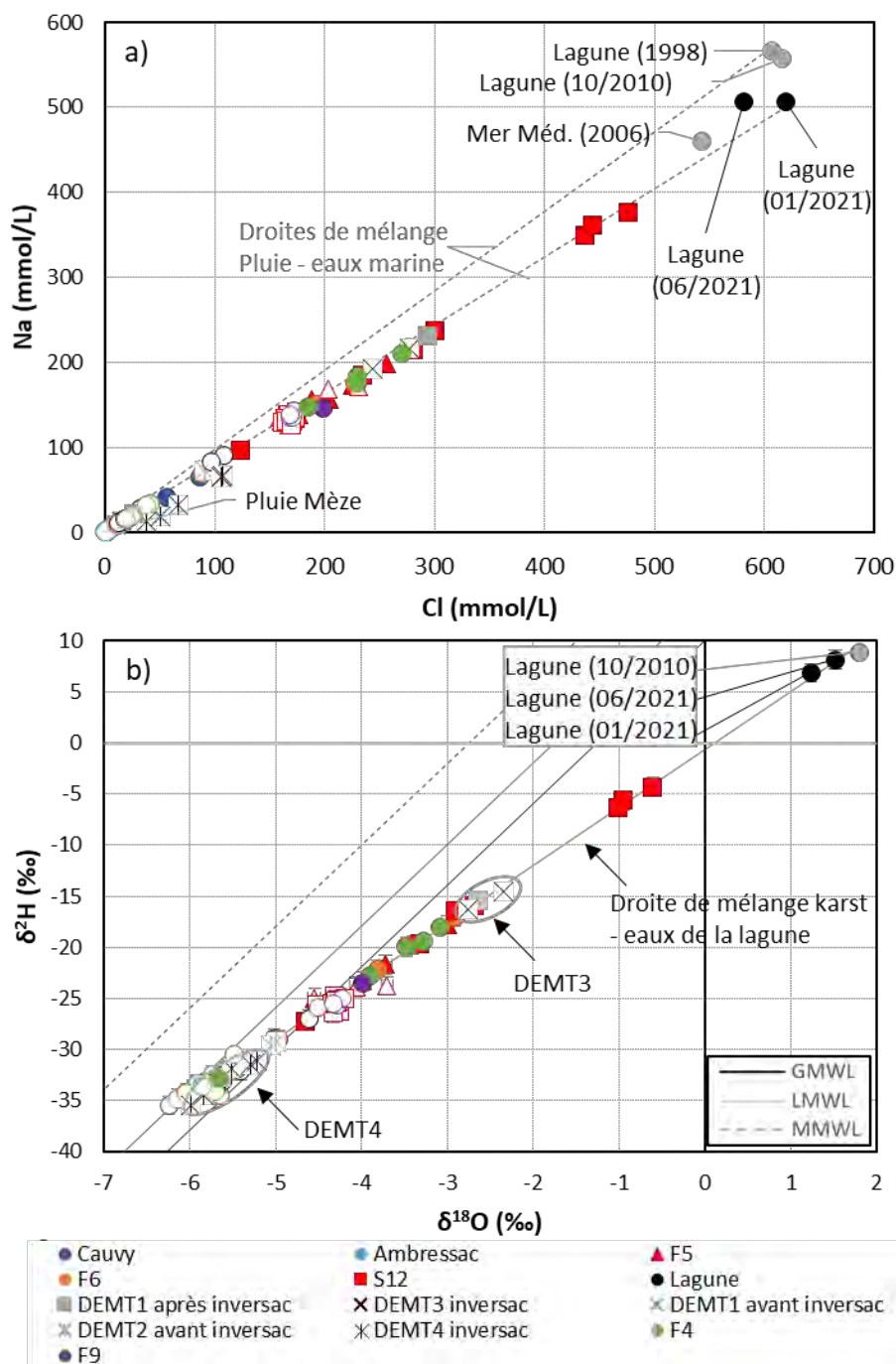


Figure 22: Digramme binaire des (a) concentrations en Na en fonction des concentrations en Cl et (b) compositions en isotopes stables de l'eau ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$) des campagnes de 2018 à 2021. Les figurés vides correspondent aux données en conditions « normales » (2018-2020) et les figurés pleins aux campagnes réalisées pendant l'inversac (2020-2021).

Dans le détail, les signatures chimiques des eaux de Cauvy, F5, F6, S12, F9 et F4, se rapprochent du pôle marin pendant l'inversac, prouvant que l'inversac affecte le système de circulation des eaux à grande échelle et en profondeur. Sur ces figures, il n'est toutefois pas possible de distinguer qui de la lagune, de la mer, d'une eau saumâtre existante dans le système en profondeur (ou des eaux thermales pour les eaux karstiques de type Cauvy, ..) impacte réellement les eaux échantillonnées. Avant de proposer des proportions de mélange, il est donc nécessaire de déterminer les pôles de mélange.

4.1.4. Evolutions des paramètres physico-chimiques et chimiques et estimation des proportions de mélange

Les données de température, pH et conductivité (annexe A4.1) et de concentration en éléments majeurs (Figure 23) mettent en évidence que les évolutions des différents points de prélèvement entre les conditions normales et durant l'inversac ne sont pas forcément linéaires, ni liées nécessairement à un simple mélange avec les eaux de la lagune de Thau.

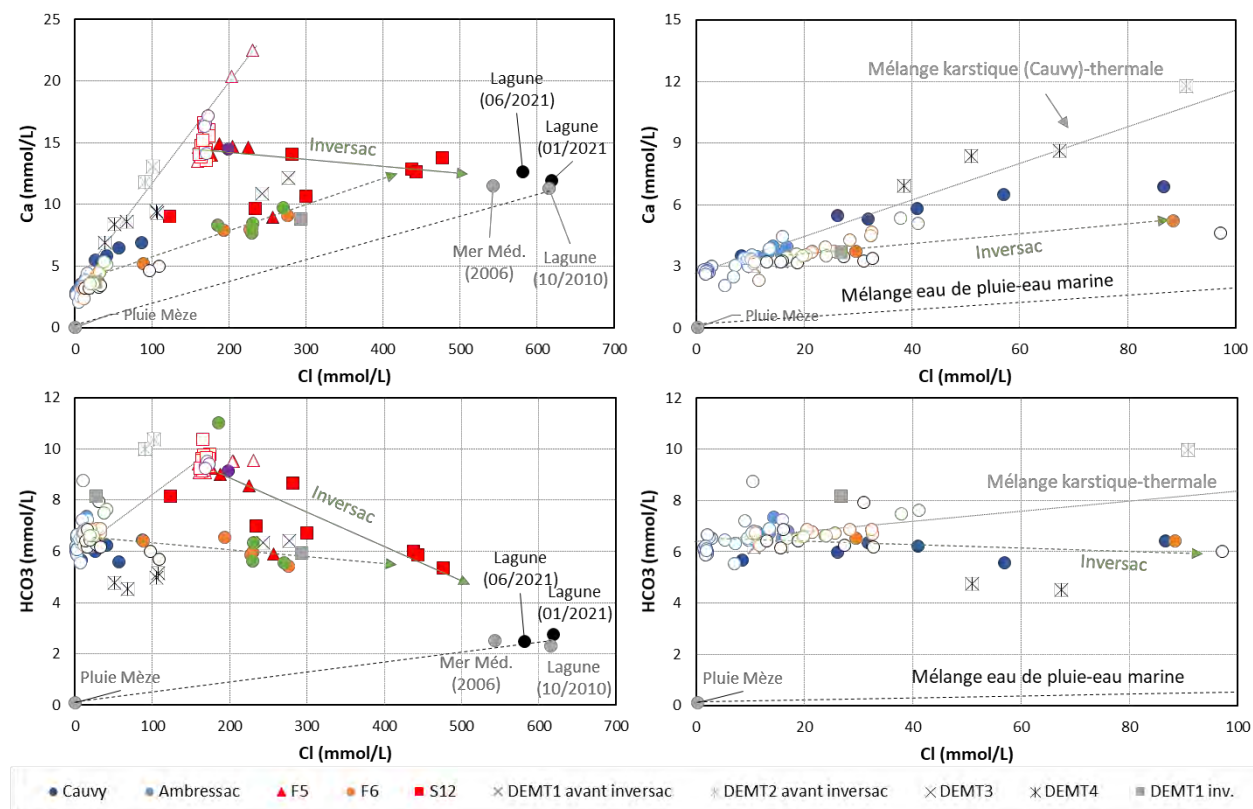


Figure 23: Données des concentrations en Ca et HCO₃ en fonction du Cl des eaux étudiées (2018-2021). Les figurés vides correspondent aux campagnes spatiales et mensuelles i.e. en conditions normal (2018-2020) et les figurés pleins aux campagnes liés à l'inversac (2020-2021). Les droites représente les évolutions des différents points de prélèvement entre les conditions normal et durant l'inversac.

La lagune, prélevée à la Vise

Les eaux prélevées à la Vise durant l'inversac correspondent en réalité aux eaux de la lagune de Thau puisque la Vise n'est plus une source, les flux s'étant inversés. Les deux nouveaux prélèvements (janvier et juin 2021) ont des valeurs similaires, proches des valeurs obtenues lors de l'inversac de 2010. Seule la température évolue réellement, avec des températures plus chaude en été (25°C environ) qu'en hiver (environ 6 °C).

Les eaux thermales

Les eaux thermales (F5, S12 et un point de F9), ont une signature et évolution particulière pendant l'inversac par rapport aux signatures mesurée avant l'inversac. L'inversac provoque une augmentation des concentrations en Cl, Na, Mg ainsi que des concentrations en Ca, HCO₃, de

la conductivité et du pH et une diminution de la température. Tous ces éléments tendent vers un pôle marin, comme précisé précédemment. En prenant les valeurs moyennes des campagnes non impactées par l'inversac comme pôle initial et la moyenne des eaux de la lagune (prélèvement à la Vise pendant l'inversac), les proportions de mélange, estimé avec le CI sont les suivantes :

Tableau 10: Proportion d'eau de la lagune de Thau dans les ouvrages F5, F9 et S12 par rapport à leur valeur moyenne en situation « normale ».

Date	Proportion d'eau de la lagune de Thau par rapport à la valeur moyenne en situation « normale »		
	F5	F9	S12
3-4/12/2020	0,2%	-	-6%
10/12/2020	-	-	9%
15/12/2020	1,6%	-	17%
7-8/01/2021	3,8%	-	35%
11/02/2021	-	-	36%
29-30/06/2021	11%	4%	15%
16-24/11/2021	6,4%	-	40%

Il est ainsi clair que les proportions de mélange avec les eaux marines provenant de la lagune augmentent avec le temps. Il apparait donc que le phénomène de l'inversac provoque une augmentation de la salinité liée à des eaux marines depuis la lagune dans ces trois ouvrages. Dans le détail, deux singularités sont mises en évidences (Figure 24), la première concerne les données du forage S12, la seconde concerne la campagne d'échantillonnage de juin 2021.

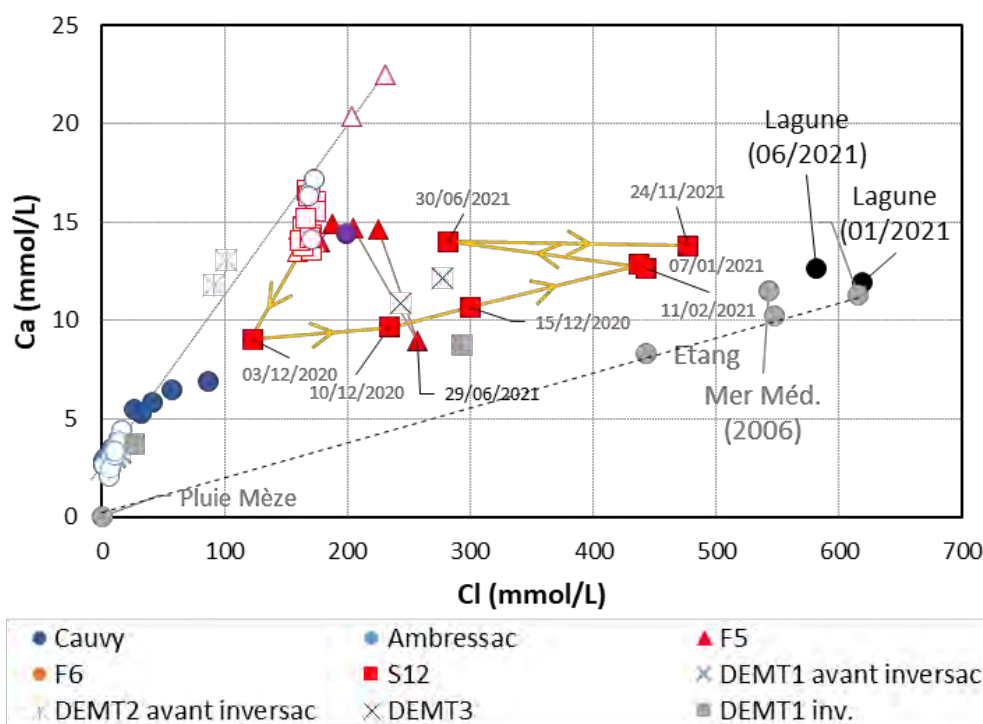


Figure 24: Evolutions des concentrations en Ca en fonction du Cl des eaux de S12 (2018-2021). Les figurés vides correspondent aux campagnes spatiales et mensuelles i.e. en conditions normales (2018-2020) et les figurés pleins aux campagnes liées à l'inversac (2020-2021).

L'évolution des résultats chimiques du forage S12 (carrés rouges), montrent deux phases : au début du phénomène d'inversac, les signatures géochimiques tendent vers un pôle d'eau karstique (cf. prélèvement du 03/12/2020, Figure 24) puis les concentrations et la conductivité augmentent pour atteindre un maximum en janvier-février 2021. Le dernier prélèvement (novembre 2021) n'est que très faiblement supérieur à ces valeurs. Il apparaît donc que le phénomène d'inversac, en réorganisant les flux amène tout d'abord des eaux d'origine karstiques. On ne peut pas exclure qu'il s'agisse ici des eaux qui s'écoulaient à la Vise juste avant le phénomène d'inversac (transfert par effet piston dans le réseau de drainage entre les sources de la Vise et S12). Par la suite, les eaux de S12 apparaissent fortement influencées par les eaux de la lagune, prouvant que la Vise et S12 sont bien connectés, pour atteindre rapidement (dès janvier) un maximum. Ce maximum semble être un mélange entre des eaux karstiques et des eaux marines de type lagune, et non une eau seulement de type lagune. Ce pôle sera mieux défini avec les résultats isotopiques (partie 4.3).

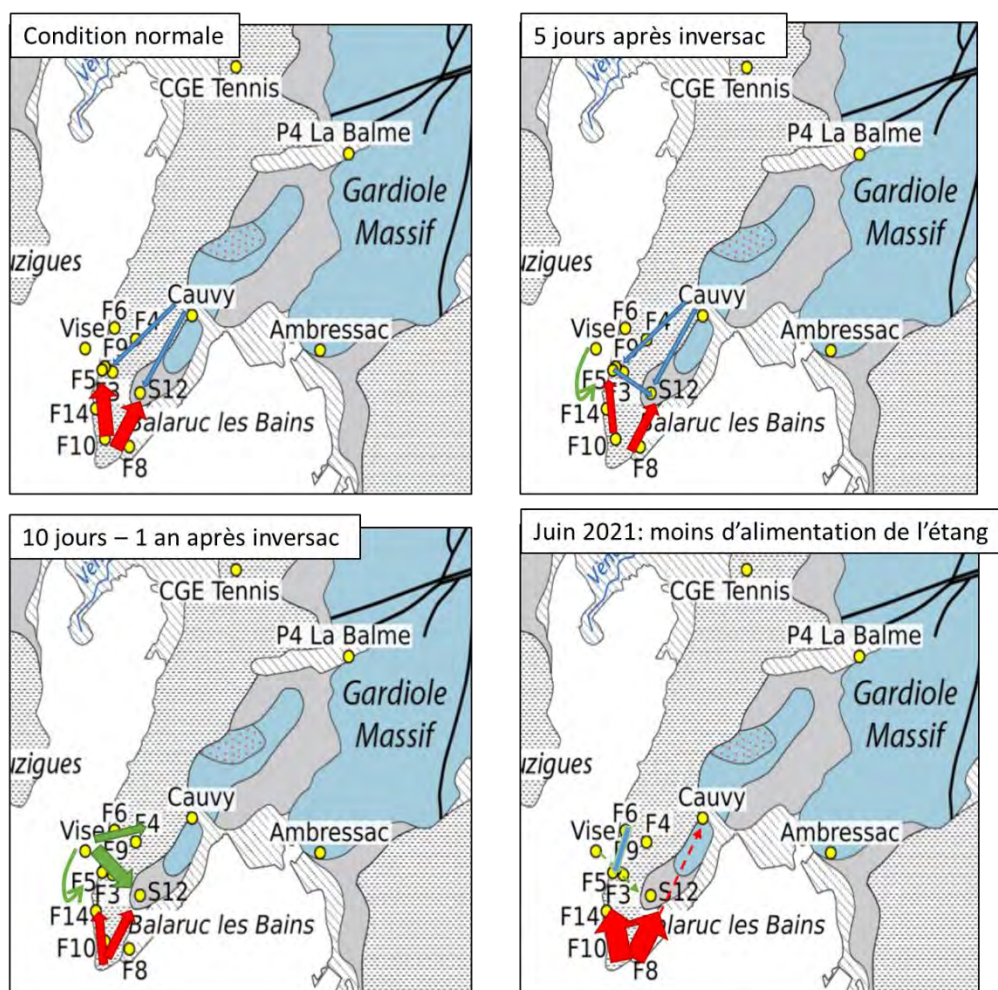


Figure 25: proposition d'interprétation des données géochimiques de F5 et S12. Ainsi en condition normale, F5 et S12 sont principalement alimentés par les eaux thermales (flèches rouges), et à faible proportion d'eau karstique de type Cauvy (flèches bleues). Cinq jours après le début de l'inversac, les eaux de F5 se rapprochent du pôle marin, probablement lié aux eaux de la lagune (flèche verte), alors que S12 se rapproche d'abord des signatures karstiques. Cette eau provient probablement du trop plein karstique qui ne peut pas sortir par la Vise. Puis plus la durée de l'inversac est grande plus les eaux de F5 et S12 se rapprochent d'un pôle marin, caractérisé par les eaux de la lagune. Les eaux atypiques de la campagne de juin 2021, prélevées après une période de recharge, peut s'expliquer par une réorganisation des flux, avec une augmentation de

proportion d'eau thermale en S12 et une signature des eaux en F5 proche des caractéristiques de F6, DEMENT1 et DEMENT3 impactés par l'inversac.

La seconde singularité concerne les prélèvements de juin 2021 : Cette campagne de prélèvement est particulière pour les ouvrages thermaux. Les eaux de S12 (30/06/21) se démarquent avec notamment une baisse de la conductivité, du pH et des concentrations en Cl, et augmentation de la température. Graphiquement, cet échantillon tend à revenir à sa signature d'origine avec des proportions plus importantes d'eau thermale et moins importantes d'eau marine. Dans le cas de l'ouvrage F5, les eaux prélevées tendent vers un faciès d'eau de type F6 les plus impactés par l'inversac (et non les eaux de la lagune). Ceci traduit aussi une réorientation des flux alimentant cet ouvrage, ne provenant pas cette fois des eaux thermales, mais d'un mélange de type F6 (voir ci-après). Cette campagne de prélèvement a été réalisée juste après une période de recharge, dont le signal hydrologique est visible dans tous le système (CGE Tennis, Ambressac, Cauvy). Cette date correspond aussi à la période où les niveaux d'eau étaient les plus faibles dans F6 et F4. Ceci indique donc que l'équilibre entre les différents flux est très sensible aux conditions météorologiques et hydrologiques, et qu'en période d'alimentation d'eau karstique plus importante, les flux principaux changent de direction (Figure 25).

Les ouvrages karstiques

Les eaux d'Ambressac prélevées pendant l'inversac sont dans les mêmes gammes de valeurs que celles prélevées pendant les campagnes qui précèdent l'inversac. L'inversac provoque toutefois une augmentation des niveaux piézométriques dans l'ouvrage associée à une augmentation des concentrations en éléments majeurs (annexe A3.4). Ceci ne semble pas être dû à un apport plus important d'eau thermale de type F8 puisque les prélèvements en période d'inversac sont plus froids (cf. annexe A4.3). La question de l'origine de l'eau mobilisée au cours de l'inversac se pose. S'il s'agit de l'eau de la lagune, et en prenant la valeur initiale comme celle mesurée juste avant l'inversac, les eaux d'Ambressac se composeraient de 0,2 (3/12/2020) à 1,1% (07/01/2021) d'eau de la lagune.

Dans le cas de Cauvy, l'impact lié à un mélange avec des eaux marines est clairement plus visible. Les digrammes binaires, comme par exemple la Figure 23, montre que l'évolution des signatures de la source Cauvy (mais aussi celle de F5, F9 et DEMENT1) peut s'interpréter comme un mélange avec un pôle lagune (atteignant 14%) mais aussi vers un pôle de mélange, caractérisé par les eaux de S12 de novembre 2021, c.à.d. les plus impactées par le mélange avec les eaux de la lagune. Ceci pourrait indiquer que les eaux de S12 sont représentatives des eaux souterraines de la presqu'île de Balaruc-les-Bains en période d'inversac. En juin 2021, les eaux de Cauvy semblent légèrement plus chaudes (annexe A4.3), ce qui pourrait traduire un mélange avec les eaux de la lagune plus chaudes à cette période, ou à un apport d'eau thermale plus important.

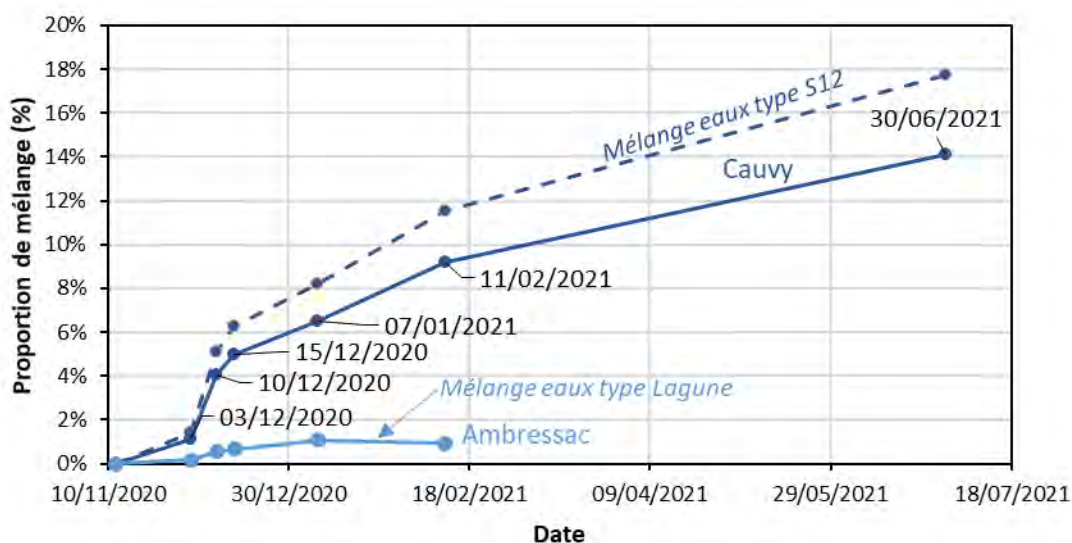


Figure 26 : Evolution des proportions d'eau de la Lagune de Thau pour Cauvy et Ambressac par rapport à leur valeur mesurée juste avant l'inversac. Pour Cauvy, les proportions de mélange ont aussi été estimées par rapport à la valeur de S12 le plus impacté par l'inversac (voir le texte pour plus d'informations).

Les ouvrages de mélange (F4 et F6)

Les eaux de F6 (et F4) évoluent au cours du temps, caractérisées par une augmentation de la conductivité et des éléments majeurs (et à une plus faible valeur de pH) et une baisse de la température. Comme pour Cauvy, la position de F6 tend dans les différentes figures vers des eaux de types lagune et/ou les eaux de S12, qui est l'ouvrage le plus impacté par le mélange avec les eaux de la lagune. Dans le détail, plusieurs évolutions sont visibles vers les eaux de la lagune ou vers les eaux thermales mettant en évidence que l'équilibre des flux provenant de la Vise, des eaux karstiques et/ou des eaux thermales est très dépendant des conditions hydrologiques, comme indiqué précédemment. Les proportions de mélanges avec les eaux de la lagune et les eaux de type S12 sont présentées dans le tableau ci-après, en prenant comme valeurs initiales les échantillons de plus basses eaux, cad les eaux les moins impactées par des mélanges avec les eaux marines. Les proportions de mélange faibles voir négatives en début d'inversac montrent que les eaux alimentant F4 et F6, comme pour S12 présenté précédemment, sont caractérisés par une proportion d'eau karstique plus importante qu'en période de basses eaux, que l'on explique provenant de la redirection des flux karstiques ne pouvant plus sortir à l'exutoire de la Vise.

Tableau 11: Proportion d'eau de la lagune dans les ouvrages F6 et F4. Les proportions de mélange ont aussi été estimées par rapport à la valeur de S12 la plus impactée par l'inversac. La valeur initiale des ouvrages est l'échantillon du 29/08/2018 correspondant à la seule période en basse eaux où ces deux ouvrages ont été prélevés au cours de la même campagne d'échantillonnage.

	Proportion d'eau marine (%)			
	F6 (initial: 29/08/2018)		F4 (initial: 29/08/2018)	
	Lagune	S12	Lagune	S12
3-4/12/2020	0,63	0,79	< 0	< 0
15/12/2020	10,0	12,5		
7-8/01/2021	26,8	33,4	25,8	32,2
11/02/2021	32,6	40,6	33,1	41,2
29/06/2021	32,3	40,3	32,9	41,1
16/11/2021	40,1	49,9	39,4	49,1

4.2. TRACEURS DES CONTAMINATIONS DE SURFACE-FLUX DE SURFACE (BACTERIOLOGIE ET NITRATES)

Les résultats en nitrates, coliformes totaux et fécaux sont illustrés en Figure 27.

La lagune prélevée à la Vise

Les eaux de la lagune sont fortement contaminées en coliformes totaux et fécaux (> 2419,6 UFC, un seul prélèvement en juin 2021) et ont un TOC élevée (> 2 mg/L) (pas de mesure de nitrate). Ceci met en évidence des contaminations récentes (inférieures à une semaine pour les coliformes fécaux, Personné et al., 1998).

Ambressac

Il a été dit précédemment que les eaux de la source d'Ambressac pendant l'inversac, mêmes si les concentrations des éléments majeurs sont du même ordre de grandeur que lors des campagnes précédentes, présentent une évolution particulière pendant l'inversac. Concernant les valeurs de nitrates et coliformes (totaux et fécaux), de la même manière que pour les éléments majeurs, celles-ci sont du même ordre de grandeur que lors des campagnes précédentes. Toutefois aucune relation ne semble apparaître entre la durée du l'inversac et l'évolution des concentrations citée précédemment. Il n'est donc pas possible de préciser si le système karstique d'Ambressac draine la lagune de Thau. Il est toutefois intéressant de noter que de telles valeurs traduisent un apport d'eau de surface récemment contaminée (inférieurs à 10 jours).

Ouvrages de la presqu'île de Balaruc-les-Bains

Aucun des ouvrages suivis (Cauvy, F4, F6, F5 ; F9 et S12) n'est contaminé par des coliformes fécaux. Seul le prélèvement de S12 du 3 décembre contient des coliformes fécaux, provenant à cette date principalement des eaux karstiques du système. Cela confirme l'existence d'une contamination récente (inférieurs à 10 jours) et donc d'origine karstique, confirmant les interprétations réalisées précédemment avec les signatures chimiques (cf paragraphe 4.1.4). Les eaux de la Vise et de Cauvy (ni F4 et F6) n'étant jamais contaminées par les coliformes totaux, il est possible que cette contamination soit en lien avec le réservoir drainé par la source

d'Ambressac. Ceci confirmerait le lien hydraulique entre Ambressac et S12 mis en évidence en mars 2018 (BRGM/RP-71281-FR Ranchoux et al., 2022)

Les ouvrages F4, F5, (F6), F9, n'ont pas non plus de coliformes totaux. Si l'évolution de leurs signatures est effectivement liée à un mélange avec des eaux de la lagune (pourtant contaminé en coliformes) cela signifie que ces bactéries sont très rapidement dégradées naturellement dans le système.

A l'inverse, les eaux de S12 et Cauvy (très faiblement et occasionnellement F6) ont des concentrations non négligeables en coliformes totaux. Cela peut provenir soit (1) de la zone fracturée en surface du Jurassique, soit (2) de la couverture Miocène puisque DENT2 est lui-même contaminé (cf partie 5.1.3), confirmant l'existence de coliforme totaux dans le Miocène.

Cas particulier de juin 2021

Il a été présenté précédemment avec les outils chimiques que la période de juin 2021 était particulière et qu'il y a eu un changement des directions des flux principaux (cf. Figure 25). A cette période, les eaux de F5 et F6 ont des valeurs positives en coliformes totaux (16,0 et 32,3 UFC respectivement) et fécaux (9,7 et 10,8 respectivement), seule fois où les coliformes sont mesurés dans ces ouvrages sur la période 2018-2021. Il s'agit aussi des valeurs de TOC les plus hautes durant l'inversac (entre 1 et 4 mg/l, tableau annexe 2). Ceci met en évidence une contamination récente (inférieure à 10 jours) par des eaux probablement karstique selon un axe de drainage nord-sud (Figure 25 complété en Figure 29) .

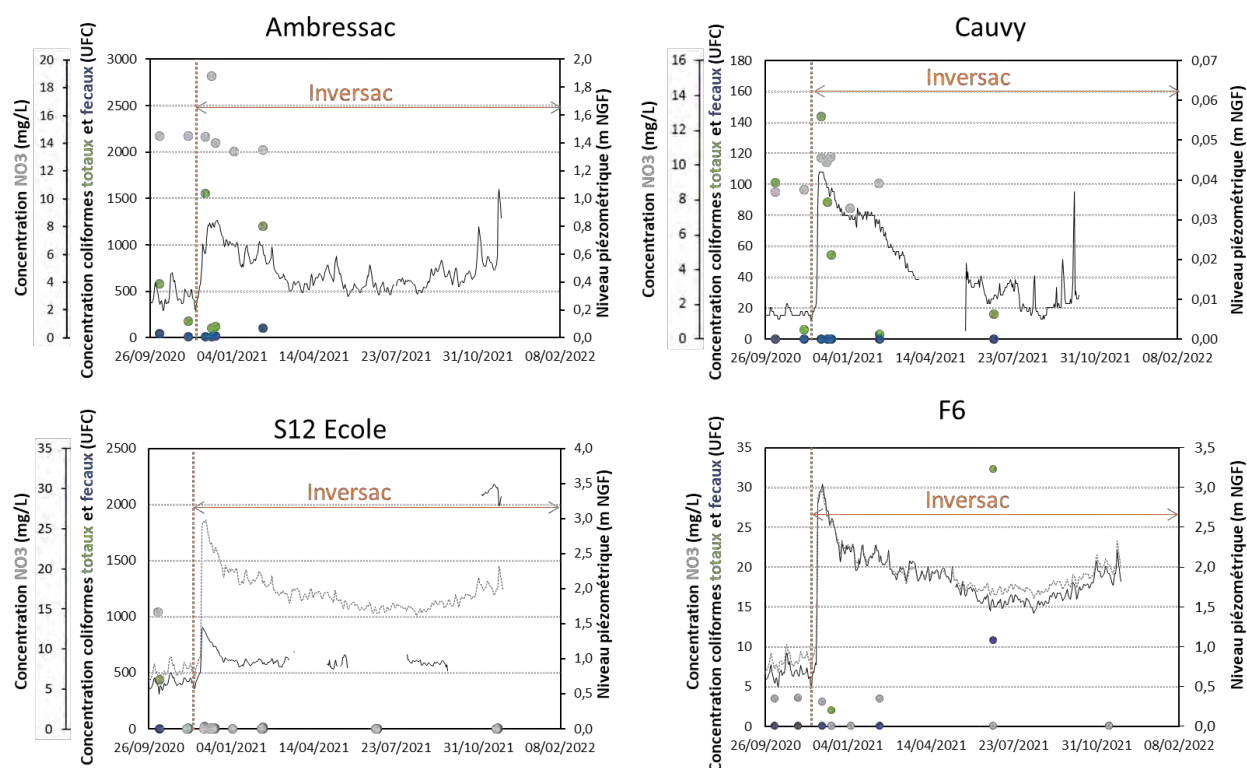


Figure 27: Evolution des concentrations en coliformes totaux et fécaux, des concentrations en NO3 et des niveaux piézométriques de Ambressac, Cauvy S12 Ecole et F6 pendant l'inversac.

4.3. EVOLUTION DES SIGNATURES ISOTOPIQUES DURANT L'INVERSAC

4.3.1. Isotopes du Strontium

Les nouveaux résultats isotopiques en périodes d'inversac (Figure 28) valident les précédentes interprétations : l'infiltration des eaux de la lagune par la Vise affectent l'ensemble des eaux souterraines de la presqu'île de Balaruc-les-Bains. En effet, il est clair sur la Figure 28 que les signatures isotopiques du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) des eaux de Cauvy, F4, F6, S12, F5, F9 tendent vers un pôle marin. Sur la base des pôles de mélange estimés précédemment, il a été possible d'estimer les proportions de mélanges qui expliquent les résultats en strontium. Pour ce calcul, le pôle thermal est représenté par F9 (décembre 2019), le pôle karstique par CGE tennis (décembre 2019) et le pôle marin par les eaux de la lagune, prélevé durant l'inversac actuel (janvier 2021). Les résultats sont présentés sur le Tableau 12. A titre comparatif et pour bien comprendre comment les eaux évoluent, les proportions de mélanges estimées juste avant l'inversac (ou le dernier prélèvement représentatif) sont aussi indiquées. L'utilisation du strontium et de son rapport isotopique permet de bien discerner les trois pôles de mélanges et donc de mieux estimer les proportions de mélanges qu'avec les éléments majeurs.

Comme mis en évidence avec tous les précédents traceurs, S12 a un comportement particulier. Initialement composé essentiellement d'eau thermale en période normale, l'inversac va modifier les directions des flux d'eau souterraine. Dans un premier temps (dès 5 jours après le début de l'inversac) S12 est alimenté par des eaux thermales (48 %) et des eaux karstiques (46%) mais aussi dès 5 jours d'eau de la lagune (6%). Dès janvier (41 jours d'inversac), un nouvel équilibre est atteint dont les nouvelles proportions sont : 60% d'eau de la lagune, 33 % d'eau thermale et 8 % d'eau karstique. Par la suite et à l'exception des échantillons de juin 2021 traités plus loin, S12 aura des proportions d'eau de ces trois pôles relativement stables.

Les évolutions en strontium de F4, F6 et Cauvy sur la Figure 28 tendent vers un pôle de plus en plus impactés par les eaux de la lagune de type S12 une fois le nouvel équilibre atteint. Dans le cas de F4 et F6, l'augmentation des proportions d'eau de la lagune se fait au dépens des eaux karstiques, dont les proportions diminuent (les proportions d'eau thermales restent dans les mêmes gammes de valeurs). Pour Cauvy, la diminution des proportions d'eau karstique est anti-corrélée à une augmentation d'eau thermale et d'eau de la lagune au même proportion. Dans un deuxième temps, les eaux de Cauvy sont caractérisées par un apport de plus en plus important d'eau de la lagune. Enfin, l'augmentation de la proportion d'eau marine dans F5 et F9 se fait en parallèle d'une augmentation d'eau karstique, au dépens d'eau thermale. En janvier 2021, F5 est beaucoup moins impacté par un apport d'eau de la lagune que F4 et F6 (Figure 29) pourtant situé à des distances similaires de la Vise. Ceci indique donc qu'il existe une connexion particulière entre F4 et F6 et la Vise et déconnectée de F5 et F9. Au vue de la géologie du site, nous proposons que la zone karstifiée au toit du Jurassique, illustrée en Figure 3, soit la zone de transfert de l'eau de la lagune. Ceci est illustré en Figure 54.

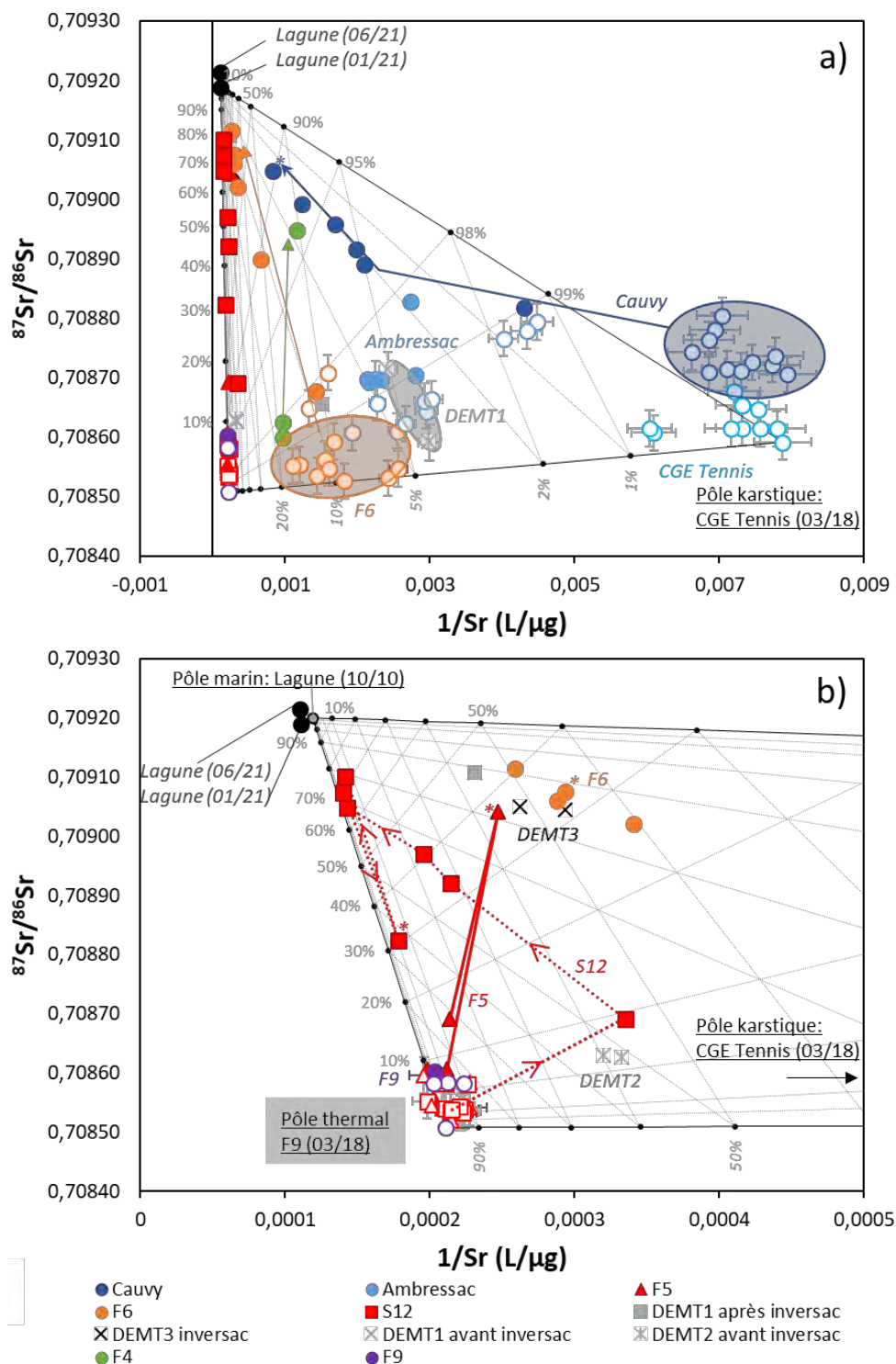


Figure 28: Rapport isotopique $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en fonction de l'inverse de la concentration en Sr en période d'inversac de tous les échantillons (a) et un zoom sur les points thermaux (b). L'astérisque permet de pointer les échantillons particuliers de juin 2021. Les figurés vides correspondent aux données en conditions « normales » (2018-2020) et les figurés pleins aux campagnes réalisées pendant l'inversac (2020-2021).

Les tendances observées questionnent sur l'évolution de la salinité des points : en effet, S12 en aval de F5, F9, F4 et F6 par rapport à la Vise est beaucoup plus impacté par un mélange avec

les eaux de la lagune (Figure 29). Ceci ne peut s'expliquer ici que par un apport d'un flux particulier en S12 par rapport aux autres ouvrages, qui serait localisé soit dans la série Miocène sus-jacente, soit au toit du jurassique, dans la partie fortement karstifiée.

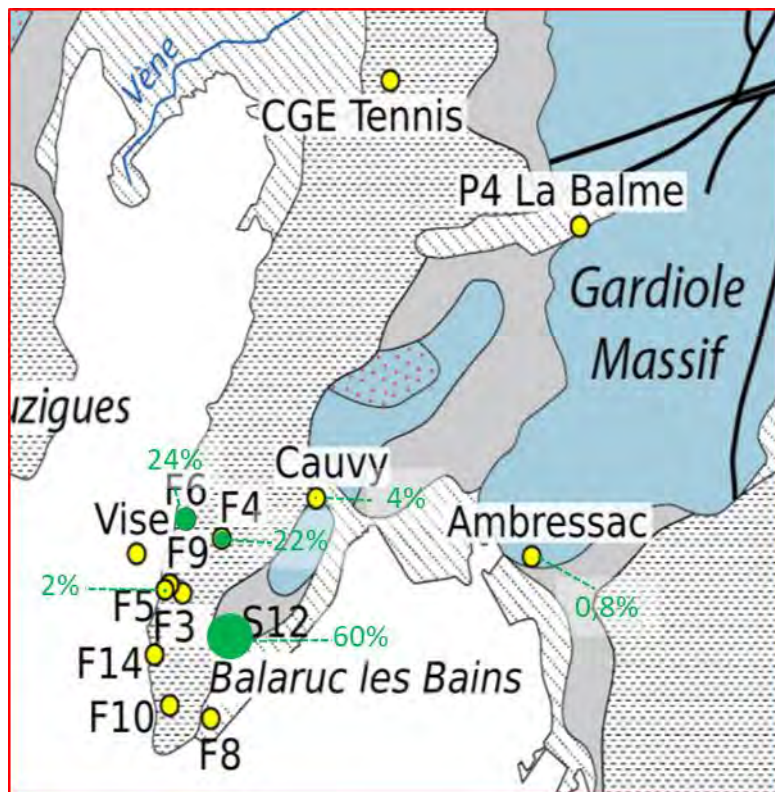


Figure 29: représentation des proportions d'eau de la lagune, estimé avec les isotopes du strontium en janvier 2021

Enfin, le strontium permet de bien visualiser l'impact de la campagne particulière de juin 2021. Comme mis en évidence en partie 4.1.4, les eaux de S12 ont des signatures qui tendent vers les eaux thermales (70% contre 30 % sur les campagnes précédentes et suivantes) aux dépens des eaux de la lagune (25 % au lieu de 65%). F4 et F6 sont quant à eux plus impactés par un mélange avec les eaux karstiques aux dépens des eaux thermales. Ces informations permettent de compléter notre compréhension du phénomène réalisé avec les paramètres physico-chimiques (Figure 25). Enfin, F5 composé essentiellement d'eau karstique (48%) et d'eau de la lagune (34%) tend à cette période vers les eaux de F6 et F4. Ceci met en évidence un flux nord-sud, comme indiqué précédemment et illustré en Figure 30.

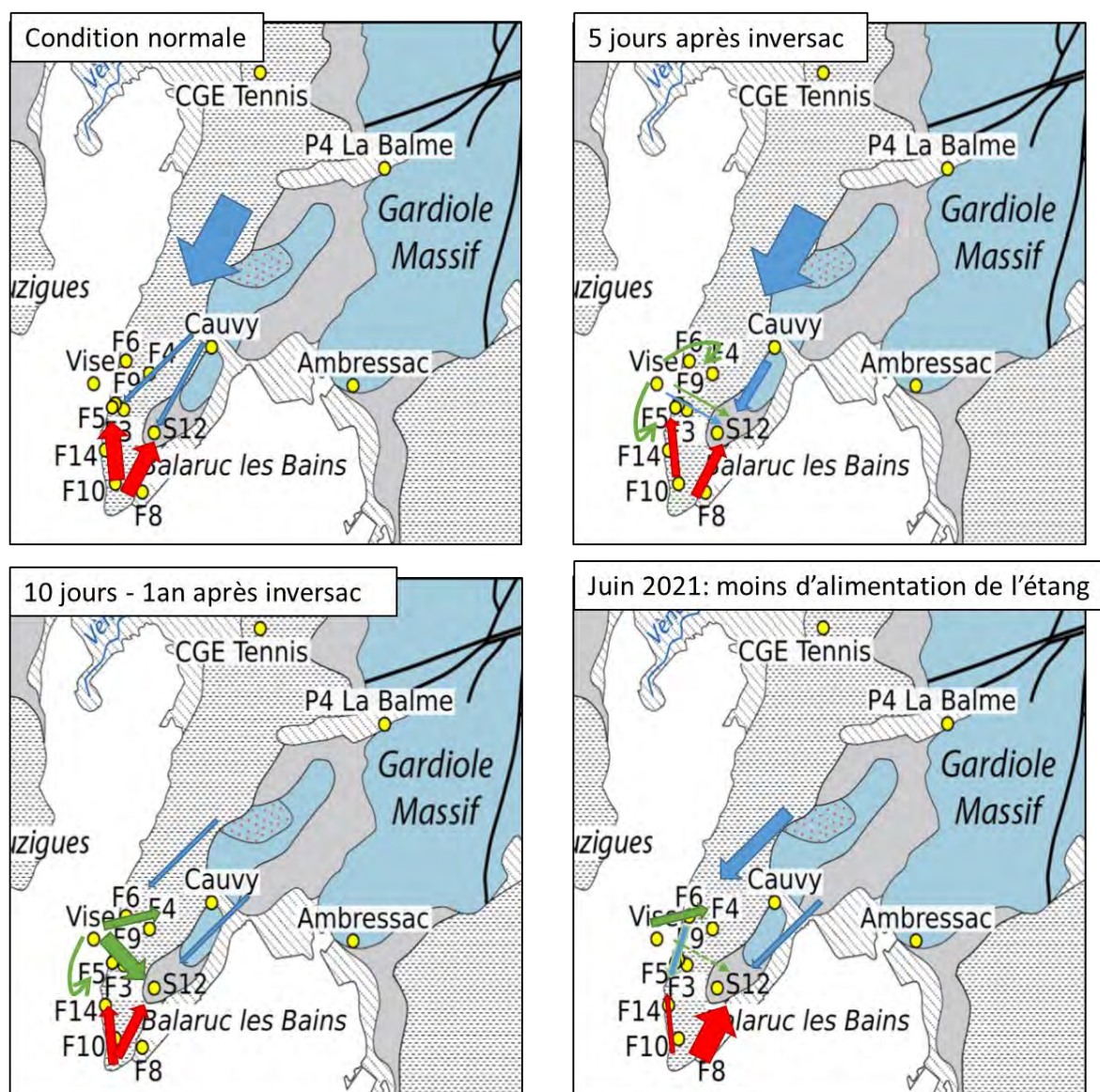


Figure 30: Schéma d'interprétation des circulations des eaux d'après la Figure 25 complétée avec les nouvelles interprétations apportées par les isotopes du strontium.

Tableau 12: Estimation et évolution des proportions de mélange à trois pôles (karstique, thermique et marin) estimées par les résultats des isotopes du strontium des eaux durant l'inversac.

Nom	Date	Proportion d'eau à trois pôles (%)		
		Pôle karstique CGE Tennis 2019	Pôle thermique F9 2019	Pôle marin Lagune de Thau 2021
Ambressac	12/11/2020	94,0	5,5	0,4
	03/12/2020	95,9	3,4	0,6
	10/12/2020	94,5	4,7	0,7
	15/12/2020	93,8	5,4	0,8
	07/01/2021	93,9	5,3	0,8
	11/02/2021	96,5	2,0	1,5
Cauvy	12/11/2020	> 100	< 0	0,2
	03/12/2020	98,7	0,5	0,8
	10/12/2020	95,0	2,4	2,5
	15/12/2020	94,8	2,3	2,9
	07/01/2021	93,8	2,3	3,9
	11/02/2021	90,9	3,1	6,0
	30/06/2021	86,4	3,5	10,1
F4 Hôtel	22/05/2019	81,9	17,4	0,6
	03/12/2020	89,9	10,4	< 0
	07/01/2021	59,4	19,8	20,8
	11/02/2021	49,8	19,8	30,4
	29/06/2021	55,9	10,4	33,7
	16/11/2021	50,5	15,5	34,0
F6	05/11/2020	89,4	11,2	< 0
	04/12/2020	89,1	9,8	1,1
	15/12/2020	78,9	12,6	8,6
	08/01/2021	61,7	14,9	23,5
	11/02/2021	56,2	13,6	30,2
	29/06/2021	58,0	11,4	30,6
	16/11/2021	54,3	8,2	37,5
F5	05/11/2020	< 0	>100	1,3
	04/12/2020	< 0	>100	< 0
	15/12/2020	0,0	97,9	2,1
	08/01/2021	6,5	91,4	2,1
	29/06/2021	47,5	18,6	33,9
	16/11/2021	13,5	77,2	9,3
F9	10/12/2019	0,0	100	0,0
	29/06/2021	2,1	96,1	1,8
S12 Ecole	12/11/2020	< 0	> 100	< 0
	03/12/2020	45,7	48,4	5,8
	10/12/2020	30,2	40,9	28,9
	15/12/2020	27,2	36,6	36,2
	07/01/2021	7,8	32,5	59,6
	11/02/2021	8,8	27,3	63,9
	30/06/2021	7,2	68,2	24,7
	24/11/2021	12,8	20,4	66,9

4.3.2. Isotopes du Lithium

Pendant le projet, il n'a pas été possible de mettre en place l'analyse de cet élément au laboratoire d'HydroSciences Montpellier, les analyses ont donc été réalisées au BRGM d'Orléans. Les coûts analytiques nous ont permis d'analyser 5 prélèvements en période d'inversac. Les nouveaux résultats en lithium en période d'inversac sont donnés en annexe 2 et illustrés en Figure 31.

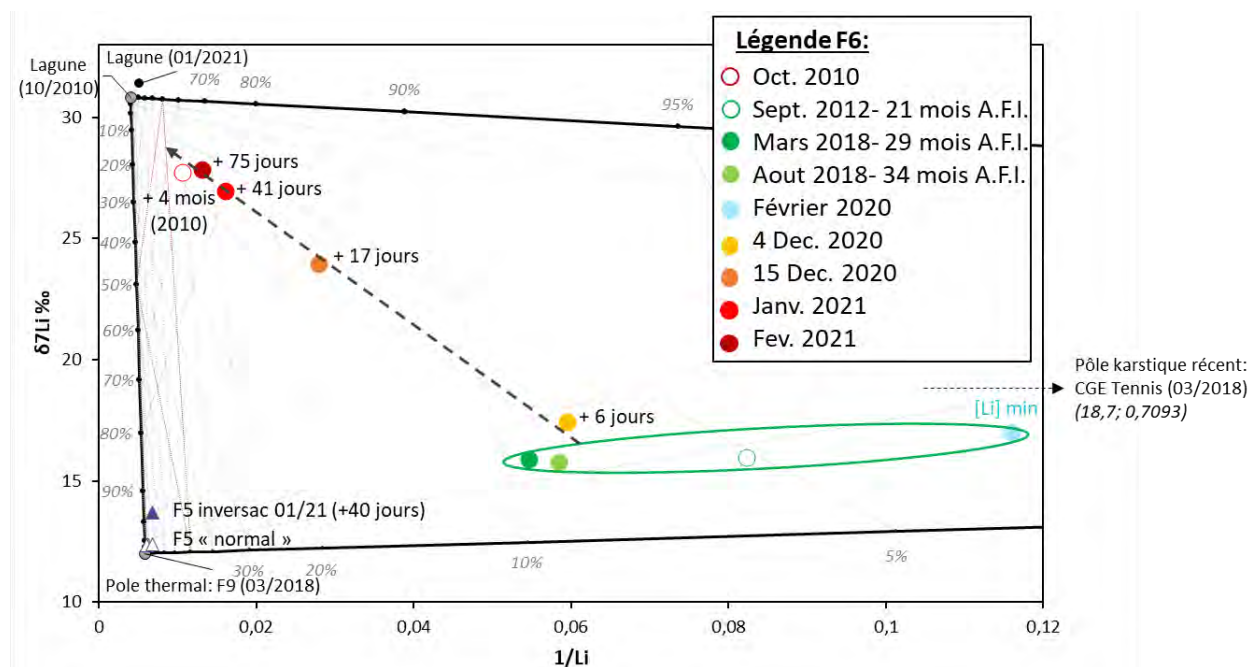


Figure 31: Evolution des signatures en Li du forage F6 (A.F.I. signifie Après la Fin de l'Inversac)

Les résultats confirment les précédentes interprétations : l'inversac modifie les signatures des eaux des ouvrages F5 et F6. En particulier, ces ouvrages sur la Figure 31 tendent vers un pôle marin. Dans le cas de F6, un maximum de proportion d'eau de la lagune semble être atteint après 75 jours d'inversac, correspondant aux mêmes proportions estimées 4 mois après le début de l'inversac de 2010.

Les proportions de mélange ont été estimées en considérant un pôle marin (lagune prélevé durant l'inversac), un pôle thermique (F9 en 08/2018) et un pôle karstique récent (CGE tennis en 08/2018), et sont présentées en Tableau 13. Les résultats sont similaires aux proportions de mélange estimées avec les isotopes du strontium.

Tableau 13: Estimation et évolution des proportions de mélange à trois pôles (karstique, thermique et marin) estimé par les résultats en lithium des eaux durant l'inversac.

Nom	Date	Proportion d'eau à trois pôles (%)		
		CGE Tennis (2018)	F9 (2018)	Lagune (2021)
F5	08/01/2021	12,5	83	4,5
	04/12/2020	91	7	2
F6	15/12/2020	81	8	11
	08/01/2021	67	8	25
	11/02/2021	60	8	32

4.3.3. Isotopes du Bore

La grande majorité des eaux échantillonnées pendant l'inversac a pu être analysée en isotopie du bore (31 points). Les nouveaux résultats sont présentés en annexe 2 et illustrée en Figure 32 et Figure 33.

Les eaux thermales (F5 et S12) ont des concentrations en bore qui augmentent au cours du temps, se rapprochant de la droite de dilution des eaux de mer. Ceci suggère que l'apport du bore dans les eaux thermales provient du mélange de plus en plus important avec les eaux de la lagune. Les mesure du $\delta^{11}\text{B}$ diminue au cours du temps. Dans le cas de F5, cette diminution ne va pas vers la signature de l'eau de la lagune mais vers un mélange entre les eaux karstiques et les eaux de la lagune, confirmant les résultats présentés précédemment. Dans le cas de S12, on retrouve le phénomène particulier vu avec l'ensemble des autres éléments présentés précédemment : d'abord un mélange avec des eaux dans la proportion d'eaux karstiques, puis vers les eaux de la lagune, sans atteindre la signature de celles-ci. Ainsi, dans ce contexte le bore ne donne pas d'information quant aux processus d'interaction eau-roche mais informe sur les mélanges qui ont lieu dans le système.

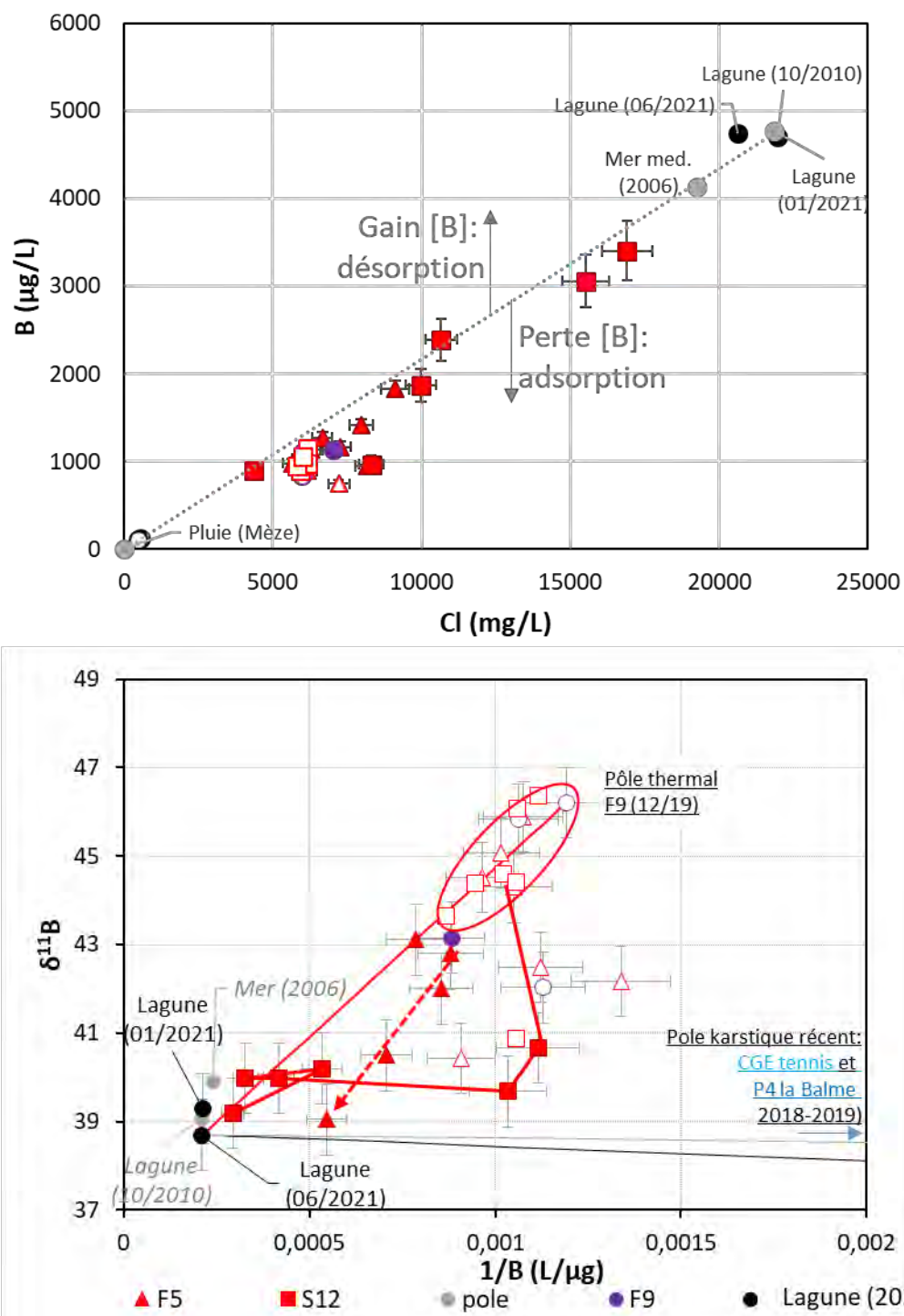


Figure 32: Evolution des concentrations et du $\delta^{11}\text{B}$ des eaux thermales (F5, F9 et S12) et des eaux de la lagune en période d'inversac.

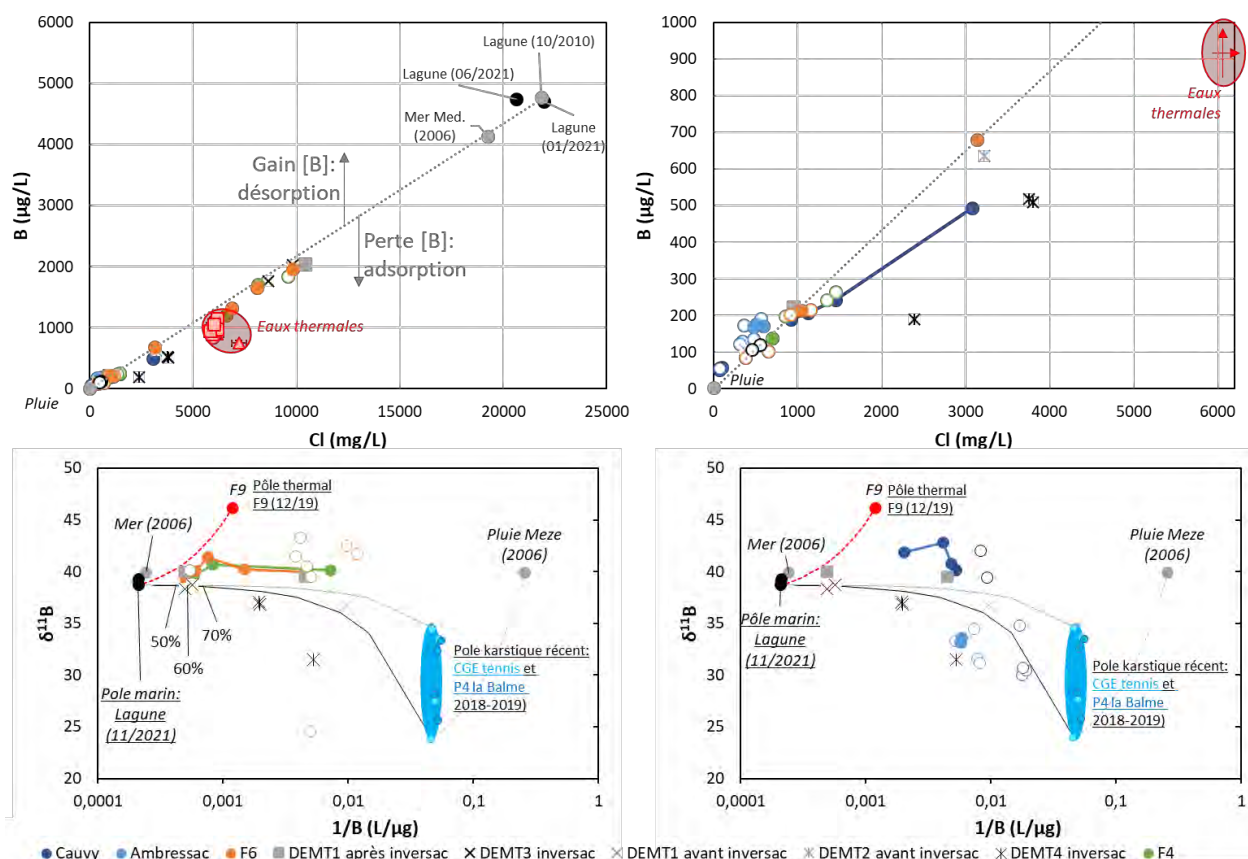


Figure 33: Evolution des concentrations (en haut) et du $\delta^{11}\text{B}$ (en bas) des eaux de F4 et F6 (à gauche) et des eaux karstiques Cauvy et Ambressac (à droite) en période d'inversac.

Les ouvrages F4 et F6 ont le même comportement en période d'inversac. Les concentrations en B vs Cl s'alignent sur la droite de dilution avec l'eau de mer, suggérant l'absence de phénomène d'absorption ou de désorption. Les évolutions des concentrations en B proviennent donc seulement du mélange avec des eaux marines. Les signatures isotopiques en $\delta^{11}\text{B}$ se rapprochent des signatures des eaux marines sans pour autant atteindre leurs signatures. Un maximum est atteint, dont les signatures proviennent d'un mélange entre les eaux karstiques (environ 60%) et les eaux de la lagune (environ 40%) confirmant les résultats présentés précédemment estimés avec les isotopes du strontium.

Les signatures d'Ambressac (concentrations en B et $\delta^{11}\text{B}$) ne varient pas en période d'inversac, et sont dans les mêmes gammes de valeurs mesurées en période « normale ». Le phénomène d'inversac ne modifie donc pas les signatures en bore d'Ambressac.

Enfin, Cauvy a des concentrations en bore qui augmentent avec le temps durant le phénomène d'inversac. Le rapport B/Cl met toutefois en évidence que le bore est en déficit par rapport au chlore, et ne s'explique donc pas par un mélange avec les eaux marines. Ces signatures peuvent toutefois s'expliquer par un mélange avec les eaux thermales. Les résultats isotopiques confirment ces résultats : les eaux de Cauvy semblent évoluer dans un premier temps vers une signature du type des eaux thermales puis dans un second temps vers un pôle marin de type lagune.

4.4. DATATION

4.4.1. Gaz dissous (Ar, Ne, He)

L'estimation des températures de recharge et de l'excès d'air avec les concentrations en Ar et Ne (voir BRGM/RP-71281-FR pour plus d'information) est très sensible aux hypothèses concernant la recharge des eaux. En contexte d'inversac, une part de la recharge de l'aquifère provient de la lagune de Thau. Dans ce contexte, il est important de prendre en compte les caractéristiques de la lagune pour chaque période d'échantillonnage (variations de la salinité et température de la lagune) et chaque point (proportion de mélange avec la lagune différente pour chaque points). Ce travail dépasse le cadre du projet DEM'EAUX Thau et nécessite une recherche plus approfondie. Ce point ne sera donc abordé dans ce présent projet.

De la même façon, la caractérisation de l'âge Hélium nécessite de prendre en compte les paramètres de recharge estimés par la méthode Ar-Ne. Trop d'incertitudes demeurent (paramètres de recharge, proportion de mélange, incertitudes sur les paramètres de la méthode hélium), dans ce contexte les déterminations de l'âge Hélium des eaux prélevées au cours de l'inversac n'ont pas été réalisées.

4.4.2. Gaz anthropiques

Les données des concentrations en CFC mesurées en pmol/L sont reportées en annexe 2. Des problèmes analytiques pour le SF₆ ne permettent pas d'exploiter les résultats de ce gaz (la colonne de séparation des gaz utilisée dans le laboratoire d'analyses des gaz a présenté des dysfonctionnements lors du passage de la série d'échantillons).

Afin de convertir les concentrations mesurées en pptv et ainsi comparées les échantillons d'eau aux valeurs atmosphériques (cf BRGM/RP-71281-FR, partie 4.3.1), il est nécessaire de connaître les températures de recharge la salinité et l'altitude moyenne de recharge (l'excès d'air n'est pas utile ici, puisqu'il ne permet de corriger que le SF₆, dont on n'a pas les valeurs ici). Une altitude de recharge de 250 m a été attribuée à toutes les eaux du bassin. La salinité des échantillons étant mesurées directement sur le terrain, seule la température doit être estimée (la conversion est très sensible à la température de recharge, à hauteur de 5 %/°C).

Les gaz dissous, généralement utilisé pour l'estimation de la température, ne nous permettant pas d'estimer les températures de recharge sur le site d'étude (voir Ranchoux et al., BRGM/RP-71281-FR pour plus d'informations, et les nouveaux résultats en annexe A3.10). Ainsi, en contexte normal, la température moyenne du bassin, estimée à 15 °C, a été utilisée pour les eaux karstiques, et une température de 13 °C a été appliquée aux eaux plus profondes et plus anciennes (cf partie 3.4.1). En contexte d'inversac, il a été montré que les eaux des ouvrages Cauvy, Ambressac, F4, F5, F6, F9 et S12 sont influencées par des mélanges, en proportions variables, avec les eaux de la lagune de Thau. Il est donc nécessaire ici d'estimer les températures de recharge en prenant compte les eaux de la Lagune.

Les températures de la lagune, mesurées en continue, sont données en Tableau 14. En considérant les proportions de mélange avec les eaux de la lagune (cf partie 4.1.4), les températures de la lagune et les températures moyenne des eaux de recharge sur les impluviums karstiques (de l'ordre de 15°C pour les eaux actuelles et estimée à 13°C pour les eaux karstiques anciennes, i.e. Pézenas, fraction d'eau karstique qui contribue au pôle thermal, cf. BRGM/RP-

71281-FR), il a été possible d'estimer les températures de recharge théorique (Tableau 14). Les résultats sont illustrés en Figure 34 et Figure 35 et reportées en annexe 2.

Tableau 14: Estimation des températures de recharge des eaux prélevées lors de l'inversac (en considérant des proportions d'eau de la lagune dans l'échantillon estimée en partie 4.1.4, la température de la lagune le jour du prélèvement et les températures de recharge des eaux karstiques (15°C pour les eaux karstiques actuelles et 13 °C pour les eaux karstiques anciennes).

Date	Température mesurée (°C)		Température de recharge estimée (°C)					
	Lagune	Cauvy	Ambressac	F6	F4	F5	F9	S12
3-4/12/2020	8,6	14,9	15,0	15,0	15,0	13,0	-	13,3
10/12/2020	7,5	14,7	15,0	-	-	-	-	12,5
15/12/2020	8,2	14,7	15,0	14,3	-	12,9	-	12,2
7-8/01/2021	4,9	14,3	14,9	12,3	12,4	12,7	-	10,2
11/02/2021	9,9	14,5	15,0	13,3	13,3	-	-	11,9
29-30/06/2021	24,1	16,3	-	17,9	18,0	14,2	13,4	14,7
16-24/11/2021	12,9	-	-	14,2	14,2	13,0	-	13,0

La représentation classique (CFC-CFC) est illustrée en annexe 4.4. L'ensemble des eaux échantillonnées en période d'inversac (à l'exception d'Ambressac) sont impactés par le phénomène d'inversac. Comme pour le strontium, on y voit clairement l'influence de mélange avec les eaux marines de la lagune mais aussi avec les eaux karstiques récentes. Afin de mieux cerner les effets du phénomène d'inversac, les résultats des gaz dissous ont été présentés en fonction des teneurs en chlorure (Figure 34). Les informations des gaz dissous obtenues sur les eaux prélevées sur les forages de la plateforme scientifique expérimentale (DEMT1, DEMT3 et DEMT4) en période d'inversac sont également reportées. Les résultats spécifiques de ces ouvrages seront commentés dans la partie 5.

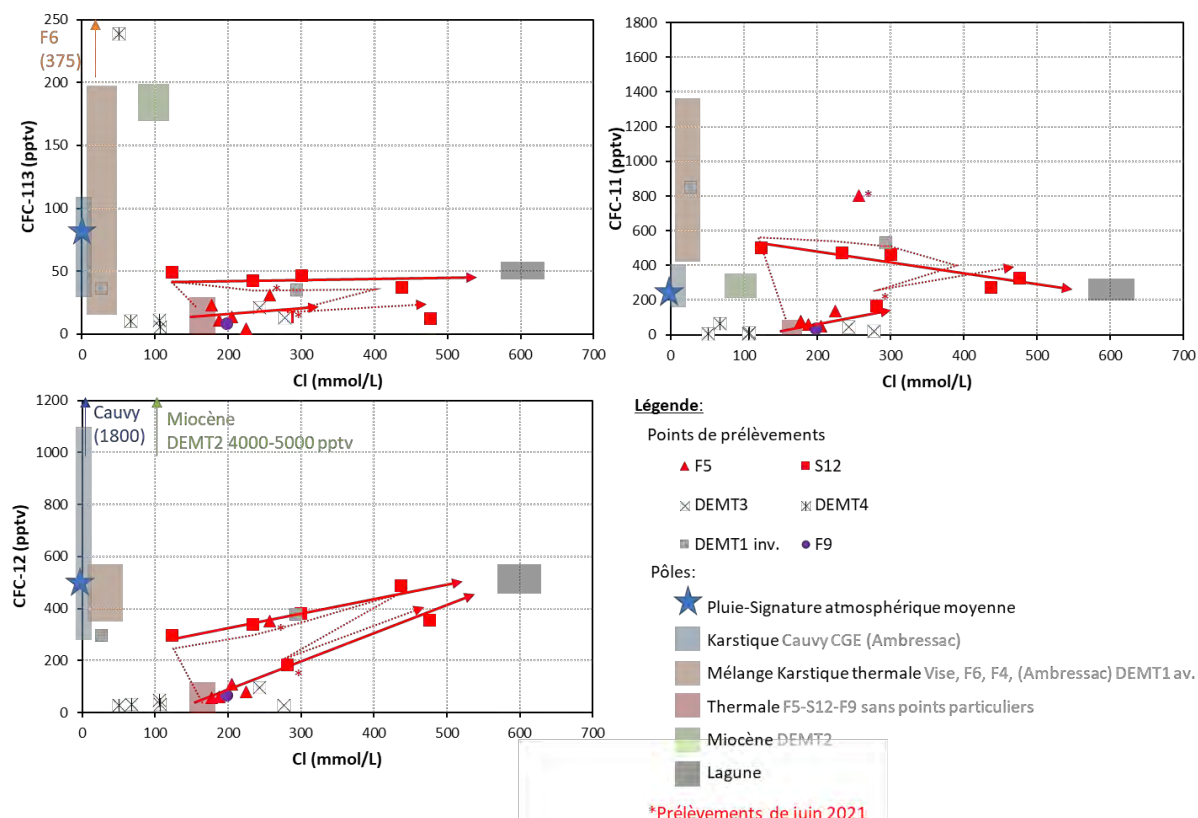


Figure 34: Teneurs en CFC en pptv en fonction des concentrations en Cl des eaux échantillonnées durant l'inversac. Un focus a été réalisé sur les évolutions des eaux thermales

La lagune, prélevée à la Vise

Les eaux de la lagune de Thau présentent des valeurs en CFC proches des valeurs atmosphériques actuelles ce qui est cohérent puisque les eaux de la lagune sont continuellement en contact direct avec l'atmosphère.

Les eaux thermales

La Figure 34 montre que l'ensemble des signatures des eaux thermales (F5, F9 et S12) évolue vers la signature du pôle lagune actuel. Ceci confirme les résultats présentés précédemment, indiquant qu'il s'agit bien des eaux actuelles de la lagune qui se mélangent avec ces ouvrages et non des eaux marines plus anciennes provenant du précédent inversac.

Dans le détail, on retrouve pour S12 une première étape de mélange avec des eaux karstiques (Cauvy-Ambressac) et/ou de mélange (F4-F6), puis un mélange de plus en plus important avec les eaux de la lagune. De la même façon que précédemment, on retrouve aussi les points particuliers de juin 2021 (F5 et S12 avec une étoile sur la Figure 34) qui se caractérisent de la même manière : les eaux de S12 tendent vers une signature thermique alors que F5 tend vers les valeurs de F4 et F6 en période d'inversac. Le scénario présentés en Figure 25 et Figure 29 semble donc aussi expliquer les valeurs en gaz.

Les eaux karstiques, les ouvrages de mélanges (F4 et F6)

Les concentrations en gaz dissous mesurées dans les eaux d'Ambressac pendant l'inversac sont du même ordre de grandeur que lors des campagnes précédentes, pouvant indiquer qu'il s'agit du même type d'eau qui alimente l'ouvrage en condition normale et pendant inversac. Il n'est donc pas possible avec ces données de mieux comprendre le comportement particulier d'Ambressac pendant l'inversac.

L'évolution des signatures en gaz des eaux de Cauvy, F4 et F6 tend globalement vers les eaux de la lagune, confirmant les résultats apportés par les autres traceurs.

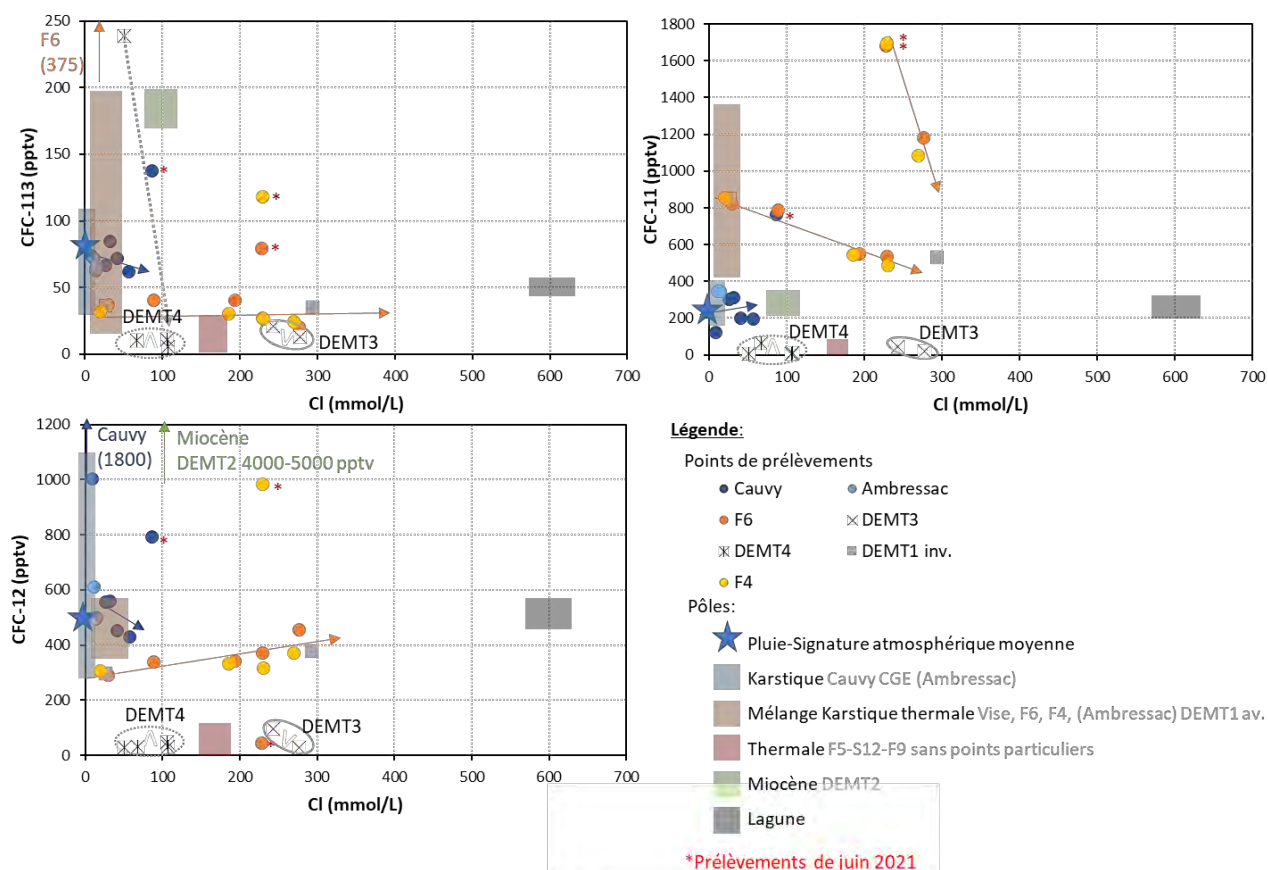


Figure 35 : Teneurs en CFC en pptv en fonction des concentrations en Cl (mmol/l) des eaux échantillonnées durant l'inversac. Un focus a été réalisé sur les évolutions de Cauvy, des ouvrages de mélanges (F4 et F6) et des forages de la plateforme scientifique expérimentale.

En juin 2021, les résultats montrent des anomalies en CFC, comme déjà souligné à cette période par tous les traceurs déjà présentés. Les valeurs en CFC sont beaucoup plus importantes que celles des autres campagnes de l'inversac.

Pour expliquer ces résultats, il faudrait que les températures de recharge de ces points soient beaucoup plus basses que celles considérées dans cette étude (Tableau 14). Cette hypothèse n'est a priori pas justifiée (les températures de la lagune en juin 2021 sont élevées de l'ordre de 24°C, les températures de l'eau de recharge du karst (impluvium) supposée de l'ordre de 15°C). Précédemment, il a été proposé que cette période est caractérisée par une modification des directions des flux (Figure 25) suite à un épisode de recharge du karst par des précipitations, Cauvy étant fortement impacté par un mélange avec les eaux thermales et F4 et F6 avec les

eaux karstiques. C'est la mobilisation de ces eaux qui expliquerait les évolutions observées en juin 2021.

5. Résultats de la plateforme expérimentale (DEMT1-DEMT2-DEMT3 et DEMT4) et de la Vise

La partie suivante se focalise sur les nouveaux forages de la plateforme expérimentale (DEMT1-DEMT2-DEMT3 et DEMT4) et sur la Vise (Localisation des installations de la plateforme expérimentale (équipement de la source de la Vise et implantations de 4 nouveaux forages)., avec une première partie sur les résultats en période « normale », c'est-à-dire hors inversac (5.1), et une deuxième partie sur les résultats en période d'inversac (5.2).



Figure 36: Localisation des installations de la plateforme expérimentale (équipement de la source de la Vise et implantations de 4 nouveaux forages).

Les eaux des 4 forages n'ont été prélevées que lors des essais de pompage, et à différent pas de temps (cf Figure 3). Pour rappel, les essais de pompage des forages DEMT1 et DEMT2 ont été réalisés en mai et juin 2020, avant le début de l'inversac débuté le 28/11/2020. Les essais de pompage des forages DEMT3 et DEMT4 ont été réalisés durant l'inversac (respectivement 44 et 382 jours après le début du phénomène) et peuvent donc être influencés par les eaux de la lagune de Thau qui contaminent les eaux souterraines du réservoir Jurassique de la presqu'île de Balaruc-les-Bains par le biais de la Vise.

Seul l'ouvrage DEMT1 a aussi pu être échantillonné en complément des essais de pompage, et en période d'inversac. Cela DEMT2 n'a pas été possible dans le forage DEMT2: l'accès à l'ouvrage a été obstrué par la foreuse en place pour la réalisation du forage DEMT4.

Il est intéressant de comparer le forage DEMENT1 avec le forage F6 puisqu'ils sont localisés à quelques mètres l'un de l'autre, le forage F6 permettant d'échantillonner et de caractériser les eaux sus-jacentes de DEMENT1 (cf Figure 3).

Les tableaux de résultats sont présentés en annexe 2. Les résultats et/ou figures complémentaires non abordés dans cette partie sont présentés en annexe 3 pour les prélèvements échantillonnés en période « normale » et en annexe 4 pour les prélèvements échantillonnés durant l'inversac.

5.1. CARACTERISATIONS GEOCHIMIQUES DES OUVRAGES DEMENT1, DEMENT2 ET LA VISE AVANT L'INVERSAC

5.1.1. Paramètres physico-chimiques et paramètres chimiques

Les paramètres chimiques des nouveaux forages DEMENT1 et DEMENT2, ainsi que les eaux de la Vise sont représentés sur le diagramme de Piper en Figure 4, ainsi que sur les figures en annexe A3.6 et A3.7. Les résultats des températures, pH et conductivité sont illustrés en Figure 37.

Les concentrations de la Vise évoluent entre les différentes campagnes. Comme précisé dans la partie 2.1.4, les prélèvements à la Vise peuvent être contaminés par des eaux de la lagune de Thau (cf. BRGM/RP-70842-FR). Ces derniers correspondent au maximum du pôle chloruré sodique représenté dans le diagramme de Piper (Figure 4). Les prélèvements de la Vise sans contamination de la lagune ont, quant à eux, des caractéristiques intermédiaires aux eaux de la source d'Ambressac et F6 confirmant qu'à l'exutoire de la Vise les eaux sont des mélanges en proportions variables des eaux karstiques et thermales.

Les nouveaux forages DEMENT1 et DEMENT2 ont des faciès chlorurés sodiques et potassiques. Le forage DEMENT1 a des caractéristiques chimiques proches de la Vise et/ou du forage F6 et/ou d'Ambressac, laissant suggérer que les eaux du forage DEMENT1 sont aussi des mélanges entre des eaux karstiques et des eaux thermales. Les conductivités, pH et températures de ces eaux sont faibles et proches des eaux du F6, mettant en évidence qu'il s'agit probablement d'une eau qui provient du même réservoir, alimentant aussi la Vise. Toutefois, les eaux de DEMENT1 sont moins impactées par une contribution d'eaux thermales que les eaux prélevées au forage F6, indiquant l'existence de la stratification en fonction de la profondeur (cf Figure 3). La durée du pompage (4 et 24 h) ne modifie pas les caractéristiques des eaux du forage DEMENT1, ce qui semble indiquer qu'il s'agit toujours du même réservoir sollicité par ce forage.

Pour rappel, le forage DEMENT2 permet le prélèvement des eaux dans les sédiments du Miocène, dans un horizon coquillé producteur. On se serait attendu à ce que ces eaux aient donc une signature qui leurs soient propres, différentes des eaux karstiques et des eaux thermales. Or ici, ce n'est pas le cas : les conductivités, pH et les éléments majeurs des eaux du forage DEMENT2 ont des signatures intermédiaires entre les eaux karstiques et les eaux thermales suivant la même tendance que pour les eaux du forage F6. Ces résultats suggèrent que le forage DEMENT2 est alimenté par un mélange entre des eaux karstiques et des eaux thermales avec des proportions d'eaux thermales plus importantes que pour le forage F6.

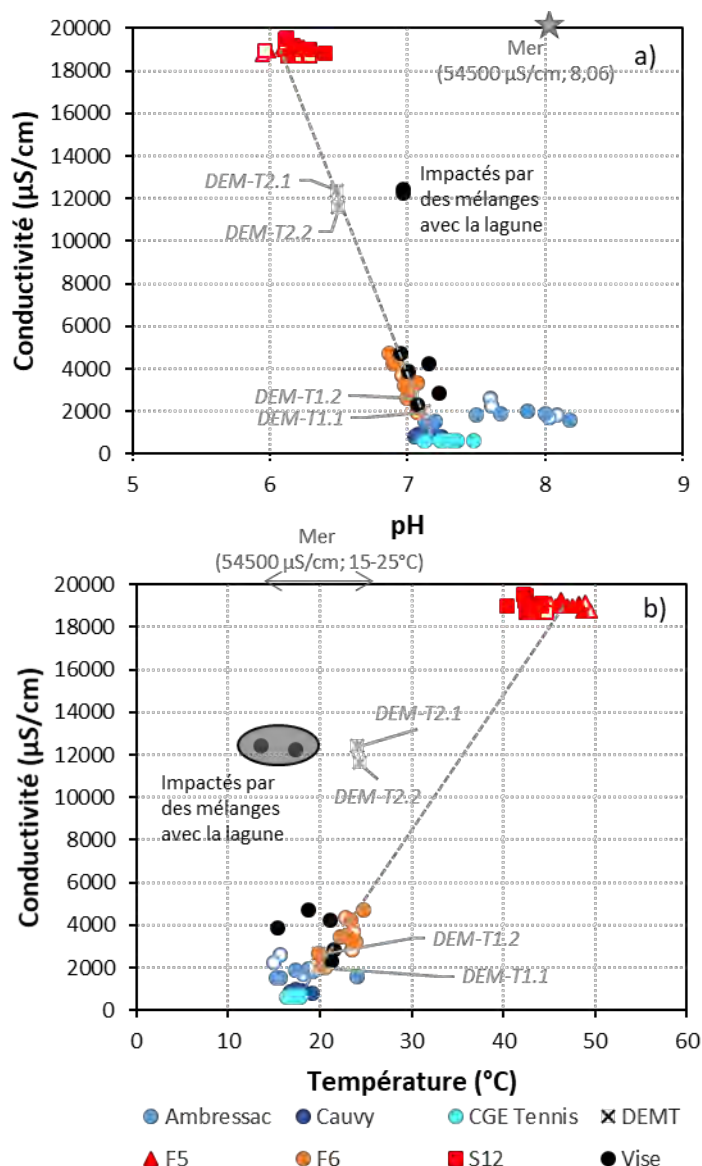


Figure 37: Données de la conductivité électrique spécifique de l'eau (25°C) en fonction du pH (a) et de la température (b) des eaux étudiées (2018-2020). Les figurés vides correspondent aux campagnes spatiales (2018-2019) et les figurés pleins aux campagnes mensuelles (2020). La droite en pointillée représente la droite de mélange entre des eaux karstiques et les eaux thermales

5.1.2. Evolution de la salinité

Comme la totalité des eaux échantillonnées pour cette étude, la Vise et les forages DENT1 et DENT2 s'alignent dans les diagrammes binaires Na/Cl (Figure 5a), et K/Cl (non représenté) sur la droite de dilution de l'eau de mer, entre un pôle d'eau de pluie locales (Mèze, environ 6 km de l'exutoire de la Vise) et un pôle marin.

Les eaux de la Vise ont des proportions d'eau marine de 3,5 % en moyenne (calculé via les concentrations en Cl, Na et K sur les données de 2020, annexe A3.3). Comme indiqué pour les ouvrages Cauvy, Ambressac et F6, l'apport d'eau marine dans ces ouvrages ainsi qu'à la Vise ne peuvent pas s'expliquer en période « normale » c.à.d. hors période d'inversac, par un apport

d'eau de la lagune ou d'eau de mer, et proviennent donc d'un mélange avec les eaux thermales. En considérant un mélange binaire entre un pôle d'eau de pluie locale (Mèze) et un pôle thermal (moyenne S12-Ecole 2018-2020), les proportions d'eaux thermales obtenues sont comprises entre 7,6 et 11,0 % (estimation sur la base des concentrations en Cl, Tableau 6).

Le forage DEMENT1 est composé d'eaux marines, dont les proportions sont estimées entre 2 et 4 % en fonction des outils utilisés et du temps de pompage et dans le cas d'un mélange avec des eaux de mer. Ces résultats sont légèrement inférieurs à ceux obtenus dans le forage F6 (compris entre 5 et 7 %). Il a précédemment été interprété que les eaux marines de F6 proviennent d'un mélange avec les eaux thermales et non des eaux de la lagune et/ou des eaux de mer actuelle (partie 3 et rapport BRGM/RP-70842-FR). En considérant que F6 et DEMENT1 soient alimentés par le même type d'eau, les résultats indiquent donc que les eaux de DEMENT1 sont moins impactées par des mélanges avec des eaux thermales (environ 6 % pour DEMENT1-1 et 10 % pour le DEMENT1-2) que le forage F6 (17 %). Il est intéressant de noter que lors du pompage, l'ouvrage DEMENT1 est alimenté par des eaux ayant une proportion d'eau thermique plus importante (Figure 38).

Le forage DEMENT2 a des proportions d'eau marine bien supérieures au forage DEMENT1 comprises entre 14 et 15 %. Les résultats des éléments majeurs ont montré que cet apport marin provient en réalité d'un mélange avec des eaux thermales et non d'un mélange avec les eaux de la lagune et/ou de la mer. En considérant un mélange binaire entre un pôle d'eau de pluie locale (Mèze) et un pôle thermal (moyenne des concentrations en F9 sur la période 2018-2020), les eaux de DEMENT2 seraient composées de 60 et 54 % d'eaux thermales pour DEMENT2-1 (1h30 de pompage) et DEMENT2 (4h de pompage)- respectivement (Figure 38). L'essai de pompage dans DEMENT2 mobilise donc des eaux moins ou pas impactés par les eaux thermales.

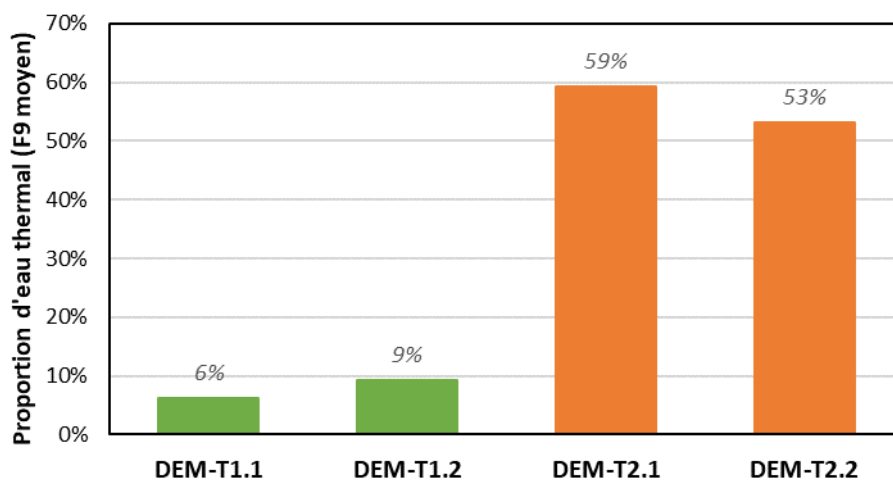


Figure 38 : Proportion d'eau thermique (en %) estimée par les concentrations en Cl des ouvrages DEMENT1 et DEMENT2, et en considérant comme pôle thermal la moyenne des concentrations en F9 sur la période 2018-2020

5.1.3. Traceurs des contaminations de surface-flux de surface

Bactériologie et nitrates

Les eaux de la Vise ont des concentrations en nitrate comprises entre 2,9 et 6,5 mg/L. Seules deux campagnes ne sont pas impactées par un mélange avec les eaux de la lagune, ne permettant pas de représenter les concentrations au cours du temps. Il est toutefois intéressant de noter que les concentrations les plus hautes mesurées (5,5 et 6,5 mg/L) proviennent des périodes non impactées par les eaux de la lagune.

Alors que dans l'ouvrage

Le forage DEMENT1 a des concentrations en nitrates comprises entre 6,1 et 8,1 mg/L (après 4 et 24 h de pompage respectivement). Comme pour la Vise et les ouvrages karstiques (Ambressac, Cauvy, CGE-Tennis, cf partie 3.2.1), cela met en évidence une pollution anthropique dans ces eaux, pouvant être liée aux activités agricoles, mais aussi à une contamination par les réseaux d'eaux usées défectueux et/ou de fosses septiques.

Enfin, les eaux de DEMENT2 ne semblent pas contaminées par les nitrates (valeurs inférieures aux limites de détection).

Les eaux de la Vise (non impactées par les eaux de la lagune) ne sont pas contaminées par les coliformes fécaux, ni par les coliformes totaux (inférieurs à 2 UFC). Les forages DEMENT1 et DEMENT2 ne sont pas non plus contaminés par les coliformes fécaux, mais ont des coliformes totaux, avec 5,3 UFC pour le DEMENT1 après 24 h de pompage et 6,3 et 2 UFC pour le DEMENT2 après 1 et 4 h de pompage respectivement. Il a été noté précédemment (partie 3.2.1) qu'à la même période, de fortes concentrations en coliformes ont été mesurées à Ambressac, Cauvy, S12 et F6. La temporalité suggère une même origine de contamination, indiquant aussi qu'un même flux karstique récent alimente tous ces ouvrages.

COT et fluorescence naturelle

Les intensités totales de fluorescence et les concentrations en COT dans les ouvrages DEMENT1 et DEMENT2 avant l'inversac sont plus faibles que les valeurs maximales rencontrées dans l'ensemble des forages thermaux des campagnes de mars et août 2018 (Figure 39), avec des intensités < 0,2 et COT < à 2 mg/l. Les proportions de composés organiques de types protéiques sont également plus faibles que celles rencontrées dans les forages thermaux. Les eaux de la Vise (non impactées par les eaux de la lagune) présentent une intensité de fluorescence faible et une teneur en COT voisine de 1,9 mg/l, dans la gamme des valeurs observées pour les sources karstiques régionales, n'indiquant pas de contamination anthropique notable.

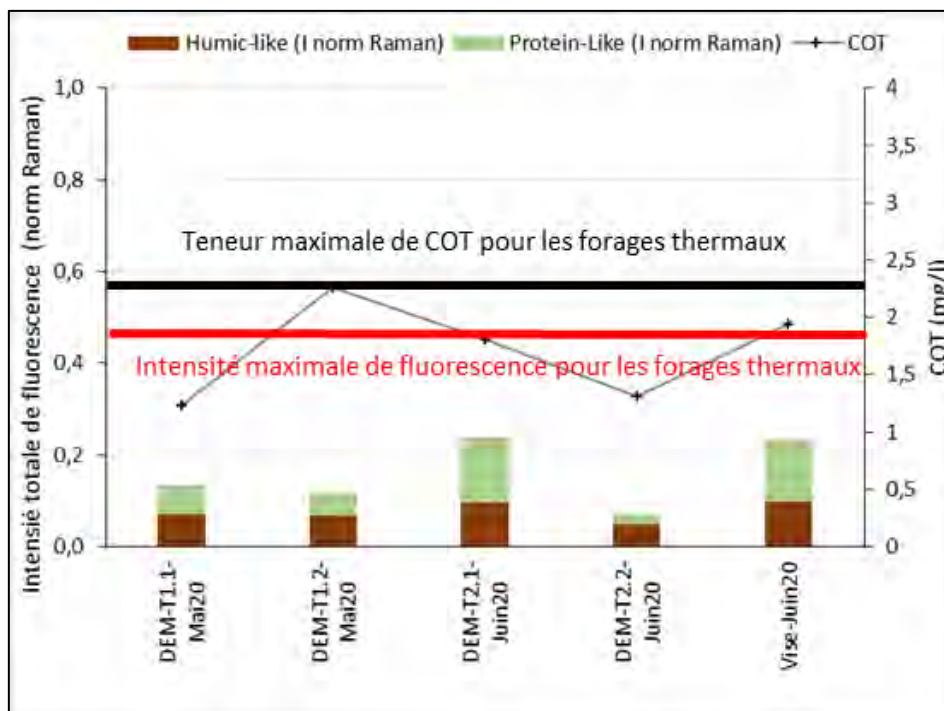


Figure 39: Proportions des composés organiques de types humiques et de types protéiques et teneurs en COT des ouvrages DEMENT1 et DEMENT2 et la Vise avant l'inversac

5.1.4. Apport des outils isotopiques, traceurs des processus d'altération et des mélanges

Isotopes du Strontium

Les rapports isotopiques en strontium des forages de la plateforme scientifique expérimentale et de la Vise sont représentés en Figure 12 (et en tableau A2.12 de annexe 2). Les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de la Vise évoluent entre trois pôles : le pôle karstique (CGE tennis de 03/18), le pôle thermal (F9 de 03/18) et le pôle marin (ici représenté par les eaux de la lagune). Comme pour les isotopes stables de l'eau ou les concentrations en Cl, Na et K, ces résultats confirment que selon les campagnes d'échantillonnage, les eaux de l'exutoire de la Vise se mélangent fortement avec les eaux de la lagune de Thau. Il semblerait que les proportions de mélange avec la lagune soient inversement proportionnelles au débit de la Vise. Les deux prélèvements les moins impactés par les mélanges avec les eaux de la lagune ont des proportions d'environ 6 % d'eau thermique et 94 % d'eau karstique (Tableau 15). Ceci est en cohérence avec les estimations réalisées avec les concentrations en Cl (cf 3.1.2). La variabilité des signatures entre les deux points non impactés par la lagune peut être expliquée par une influence plus ou moins importante des eaux provenant de la Gardiole par rapport aux eaux provenant du causse d'Aumelas.

Les eaux de DEMENT1 ont des signatures en rapport isotopique $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ proches des eaux de la Vise, de F6 et d'Ambressac. Les eaux alimentant cet ouvrage sont donc des mélanges en proportions variables d'eaux thermales et d'eaux karstiques provenant aussi bien de la Gardiole (type Ambressac) que du Causse d'Aumelas (type de CGE Tennis). A la même période (27/05/20), les eaux de DEMENT1 ont des proportions d'eaux thermales moins importantes (environ 4 %) que le forage F6 (environ 18 %), ce qui est cohérent avec les résultats précédents (cf partie 5.1.2). Les résultats $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ confirment que l'augmentation du temps de pompage augmente les proportions d'eaux thermales dans le forage DEMENT1.

Enfin, les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ du forage DEMENT2 s'expliquent principalement par un mélange binaire entre les eaux thermales (environ 53 %) et les eaux karstiques (environ 42 %) (Figure 12, Figure 28 et Tableau 15).

Tableau 15 : proportions de mélange à trois pôles des eaux de la plateforme expérimentale.

Nom	Date	Proportion d'eau à trois pôles		
		Pôle karstique CGE Tennis 2018	Pôle thermal F9 2018	Pôle marin Lagune de Thau 2021
DEM-T1.1	27/05/2020	96%	4%	0%
DEM-T1.2	28/05/2020	95%	4%	1%
DEM-T2.1	02/06/2020	41%	54%	6%
DEM-T2.2	02/06/2020	43%	52%	5%
Vise	04/06/2020	94%	6%	0%
	07/07/2020	93%	6%	1%
Vise (influence lagune)	03/09/2020	92%	6%	3%
	08/10/2020	91%	6%	3%

Isotopes du Lithium

Comme pour le Sr, les signatures isotopiques en Li du DEMENT1 sont similaires à celles de la Vise, elle-même intermédiaire entre Ambressac et F6 (Figure 13, tableau A2.12 de annexe 2). Ces quatre points de prélèvement mobilisent donc le même type d'eau, dont les variations chimiques sont dues à des proportions de mélanges différents entre les eaux karstiques et les eaux thermales. En fonction du pôle karstique choisis, les eaux de DEMENT1 sont composées de 95 à 97 % d'eaux karstiques et de 3 à 5 % d'eaux thermales.

La signature isotopique du Li mesurée sur les eaux du forage DEMENT2 s'explique par un mélange binaire entre les eaux thermales (environ 55 %) et les eaux karstiques (environ 45 %), confirmant l'ensemble des résultats présentés précédemment.

Isotopes du Bore

Les résultats des concentrations en bore et des rapports isotopiques $\delta^{11}\text{B}$ des forages DEMENT1 et DEMENT2, et de la Vise sont présentés en Figure 14 et Figure 15 et dans tableau A2.12 de annexe 2. Seuls les deuxièmes points de prélèvements des essais de pompages des forages DEMENT1 et DEMENT2 ont été analysés en $\delta^{11}\text{B}$ (prélevés après X heures de pompage pour chaque forage).

Les concentrations en bore de DEMENT1 et de la Vise sont sur la droite de dilution des eaux de mer suggèrent que les concentrations en bore pourraient simplement s'expliquer par un mélange avec les eaux marines. Les données en $\delta^{11}\text{B}$ en fonction des concentrations en bore (et l'inverse des concentrations en bore) de DEMENT1 se situent sur la droite de mélange entre les eaux de CGE tennis (bas) et les eaux de la lagune. Avec ces seules informations, on pourrait penser que le bore (les concentrations et le rapport isotopique) de DEMENT1 s'explique donc simplement par un mélange entre les eaux douces karstiques et les eaux marines. Or, les isotopes du strontium ont mis en évidence que les eaux de DEMENT1 sont des mélanges entre les eaux karstiques et les eaux thermales sans apport d'eau marine. Les concentrations en bore des eaux de DEMENT1 étant simplement liées à la dilution des eaux de mer (sur la droite en Figure 14), seul un processus de mélange peut expliquer les valeurs en $\delta^{11}\text{B}$ de cet ouvrage. En considérant une signature

théorique des eaux thermales de 30 % d'eau marine et 70 % d'eaux karstiques sans interaction eau-roche spécifique (Figure 40) et une eau de type CGE Tennis (signature la plus basse en $\delta^{11}\text{B}$), il est possible de retrouver les interprétations réalisées avec les rapports isotopiques du strontium. Dans ce cas, les rapports isotopiques du bore s'expliqueraient donc par 6 % d'eau thermale sans interaction eau-roche et 94 % d'eau karstique, ce qui est cohérent avec les résultats précédents. Ceci met donc en évidence que les eaux de DEMENT1 se mélangent avec des eaux thermales qui n'ont pas encore interagi avec des argiles et/ou de la matière organique. Au vu de nos hypothèses présentées en partie 3.3.3, **il semblerait donc que les processus d'adsorption du bore mis en évidence dans l'aquifère Jurassique se font au toit du Jurassique au contact avec la formation argilo-silteuse du Miocène et non plus profond.**

Les concentrations en bore de DEMENT2 se situent en dessous de la droite de dilution des eaux de mer, comme observées pour les eaux thermales. Ceci suggère l'existence de processus d'adsorption du bore sur la matière organique et/ou les argiles. Les rapports isotopiques $\delta^{11}\text{B}$ des eaux de DEMENT2 s'expliquent simplement dans les différentes figures par des mélanges entre les eaux karstiques et les eaux thermales les plus impactées par les processus d'adsorption (donc les eaux dont les processus sont les plus aboutis). En considérant un mélange entre S12 école dont le $\delta^{11}\text{B}$ est le plus haut et des eaux de type CGE tennis haut (mai 2019), les eaux de DEMENT2 s'expliquent par 30 % d'eau karstique et 70 % d'eau thermale. Pour que ces résultats soient cohérents avec ceux du strontium (environ 50 % d'eau karstique et d'eau thermale), il faudrait (1) soit que les eaux thermales aient des concentrations en bore beaucoup plus importantes (non échantillonnées sur le site), (2) soit que les eaux karstiques qui alimentent DEMENT2 soit plus chargées en bore, de type Ambressac.

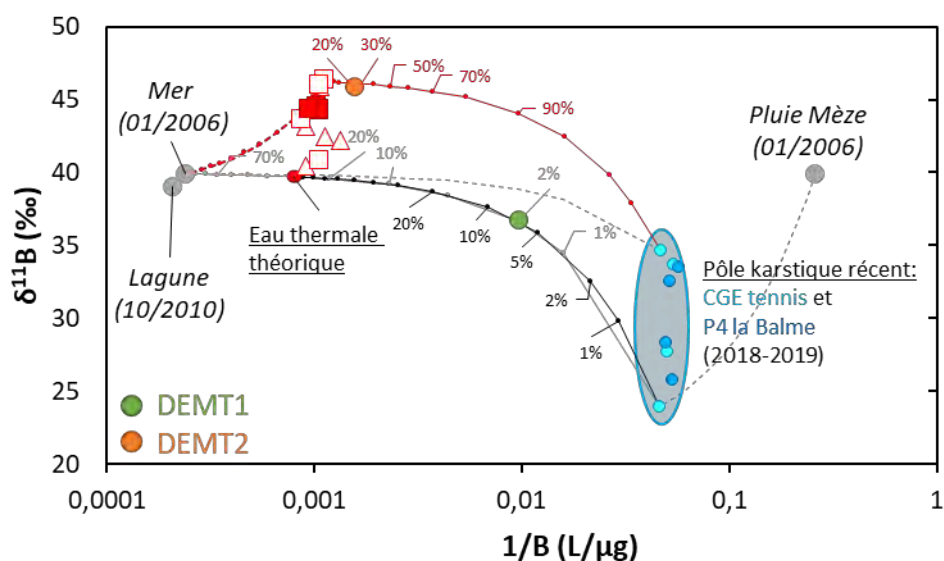


Figure 40: Diagramme du $\delta^{11}\text{B}$ en fonction de l'inverse de la concentration en B des forages DEMENT1 et DEMENT2. Les courbes rouges représentent des mélanges entre les eaux thermales les plus impactées par les processus d'adsorption et (1) une eau karstique type « CGE-Tennis haut » (trait plein) ou (2) avec les eaux de mer (trait en pointillé). Les courbes grises représentent les mélanges entre les eaux de mer et les eaux karstiques récentes. Enfin, la courbe noire représente un mélange entre les eaux thermales théoriques (30 % eau de mer – 70 % eau karstique de type « CGE-Tennis bas ») non impactées par les processus d'interaction eau-roche.

5.1.5. Datation

Gaz anthropiques

Les données des concentrations en CFC et SF₆ mesurées en pmol/L puis converties en pptv sont reportées en annexe 2 (Tableaux A2.14 et A2.15), et illustrées en Figure 16 et Figure 17. La température moyenne de la zone de recharge, estimée à 15 °C, a été utilisée pour les eaux des forages DEMENT1 et DEMENT2. Une correction de l'EA a été appliquée aux teneurs en SF₆. Enfin, une altitude de recharge de 250 m a été attribuée à toutes les eaux du système hydrogéologique de Thau.

Il a été mis en évidence trois types de pollutions en CFC et SF₆ sur la zone d'étude (cf partie 3.4.1). Pour rappel, la première pollution est portée par le forage F6, caractérisée par de fortes valeurs en CFC-113 et en CFC-11. Cette contamination s'observe très régulièrement puisqu'elle touche la quasi-totalité des points de F6, et spatialement puisque la Vise, DEMENT1 et DEMENT2 sont aussi impactés. La deuxième contamination est aussi portée par le forage F6 (juillet et en octobre 2020), caractérisée par des valeurs hautes en SF₆. Elle a été enregistrée dans les ouvrages karstiques (Ambressac, Cauvy et CGE tennis) ainsi qu'à la Vise (octobre 2020). Les forages DEMENT1 et DEMENT2 n'ayant pas été échantillonnés à cette période, il n'est pas possible de vérifier si cette contamination affecte aussi ces ouvrages.

Il a été proposé précédemment (partie 3.4.1) que l'origine de ces deux pollutions affectant tous les ouvrages karstiques de la presqu'île de Balaruc-les-Bains sans impacter les eaux rattachées au compartiment amont (comme par exemple Issanka, voir partie 3.4.1 et le rapport L5a, BRGM/RP-71281-FR) ces contaminations seraient attribuées à une recharge sur le massif de la Gardiole. Ceci permet de préciser que la Vise, DEMENT1 et DEMENT2 sont en partie alimentés par les eaux provenant de la Gardiole.

Enfin la troisième contamination est portée par le DEMENT2 (une période d'échantillonnage lors des essais de pompage), et se caractérise par un apport important de CFC-12. Cet excès est aussi visible dans tous les ouvrages karstiques à plusieurs reprises (Ambressac, Cauvy et CGE tennis) mais ne semble pas (ou peu) impacter la Vise, F6, DEMENT1 ni les ouvrages thermaux (Représentation graphique des résultats de SF₆, CFC-11, CFC-12 et CFC-113 des eaux étudiées entre 2018 et 2020. Les figurés vides correspondent aux données spatiales (2018-2019) et les figurés pleins aux campagnes mensuelles avant l'inversac (2020).. Il semblerait donc que cette pollution se situe dans les séries du Miocène et/ou du Plio-Quaternaire sus-jacent, dont les eaux proviennent essentiellement du massif de la Gardiole.

Les forages DEMENT1 et DEMENT2 sont donc contaminés en CFC et SF₆, ce qui ne nous permet pas de dater les eaux. La contamination du DEMENT1 semble être comparable à celle de la Vise et F6, mettant en évidence une nouvelle fois qu'il s'agit du même type d'eau. Pour DEMENT2, la pollution spécifique en CFC-12 met en évidence que l'ouvrage est alimenté au moins en partie par des eaux différentes de DEMENT1, que nous proposons être des eaux circulant dans les sédiments miocènes. La présence de contamination en CFC-11 et CFC-113 dans cet ouvrage indique que l'aquifère jurassique alimente aussi l'ouvrage. Les faibles valeurs en SF₆ (1,5 et 1,7 pptv) indiquent toutefois qu'une grande partie des eaux est ancienne (> 50 ans).

Tritium

Le forage DEMENT2 a une valeur de tritium inférieure à la limite de détection ($< 0,5$ UT), confirmant que la moyenne des eaux alimentant l'ouvrage est ancienne, supérieure à 70 ans.

DEMENT1 a une valeur de 2,1 UT. Seul, le tritium ne permet pas de dater puisque les valeurs atmosphériques en tritium ont varié considérablement et qu'il est donc nécessaire, comme pour la datation par les gaz anthropiques, de disposer soit d'une chronique de mesure suffisamment longue pour rechercher un modèle de transfert ou de mélange capable d'expliquer les mesures en tritium, soit de croiser cette information ponctuelle avec celle issue d'autres traceurs de datation. Or, les mesures en CFC et SF6 des eaux de cet ouvrage étant contaminées, il n'est pas possible d'utiliser cette information pour préciser l'âge de l'eau. Cette valeur en tritium supérieur au seuil de détection informe toutefois que DEMENT1 est alimenté, du moins en partie, par des eaux récentes.

Hélium

Les âges Hélium des ouvrages DEMENT1 et DEMENT2 sont estimés avec la méthode présentée dans le livrable L5a. Pour rappel, une distinction est faite entre les eaux circulant dans les sédiments Miocènes (DEMENT2) des eaux circulant dans le calcaire Jurassique (DEMENT1). Les paramètres utilisés pour les forages de la plateforme scientifique expérimentale sont résumés ci-après (Tableau 16).

Tableau 16: Paramètres utilisés pour le calcul du taux de production d'hélium pour DEMENT1 et DEMENT2. Le choix des paramètres est discuté dans le rapport L5a (BRGM/RP-71281-FR).

Paramètres	DEM-T1.1	DEM-T1.2	DEM-T2.1	DEM-T2.2
Densité de la roche	2,6		2,1	
Porosité (%)	0,5 et 1		0,5 et 1	
Concentration uranium (ppm)	0,74		2,12	
Concentration thorium (ppm)	0,84		2,01	
Proportion du flux karstique (%) (Corrigé de l'apport d'eau thermale)	95		40	46

Les concentrations en He des ouvrages ont été corrigées de l'apport d'eau thermale (5 % pour DEMENT1 et 60-54 % pour DEMENT2) afin de mieux estimer les âges de la composante d'eau karstique.

Les âges Hélium obtenus sont compris entre 2 500 et 4 500 ans pour DEMENT1 pour une porosité à 0,5 % (entre 5 000 et 9 000 ans pour une porosité de 1 %), c'est-à-dire dans les mêmes gammes d'âge des eaux de F4 et F6. L'échantillon à 24 h de pompage présente un âge Hélium plus important, l'augmentation du temps de pompage semble donc mobiliser des eaux plus anciennes, que l'on suppose provenir principalement de la matrice carbonatée.

Les eaux de DEMENT2, corrigées de l'apport d'eau thermale, ont des âges He compris entre 11 000 et 17 000 ans pour une porosité à 1 % (entre 23 000 et 34 000 ans pour une porosité de 1 %). Ceci est cohérent dans un contexte de circulation d'eau lente dans les sédiments marneux du Miocène. La porosité du Miocène est inconnue et pourrait être plus importante, ce qui se traduirait par une augmentation des âges He estimés. L'échantillon à 24 h de pompage présente un âge Hélium plus faible, ce qui suggère la mobilisation d'une eau plus jeune au cours du pompage dont l'origine demande à être précisée.

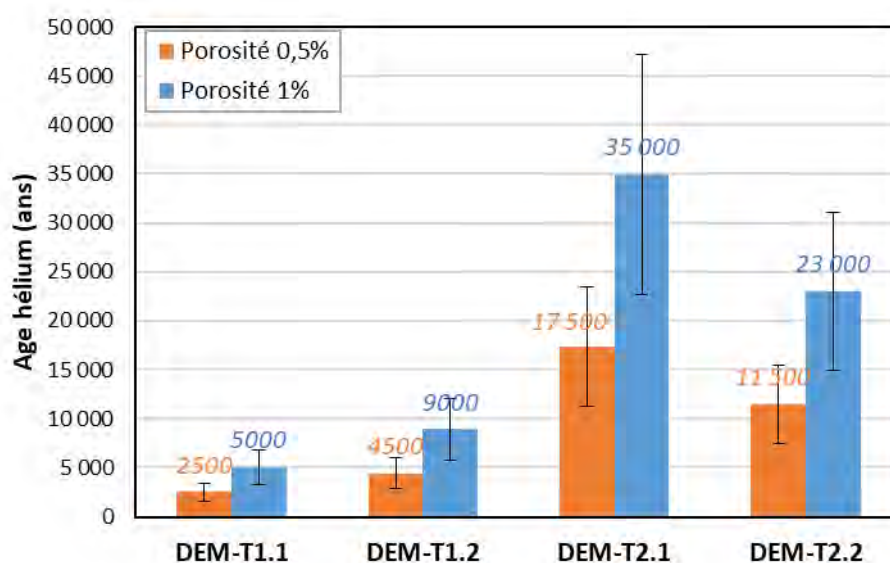


Figure 41: Age hélium des eaux de DEMENT1 et DEMENT2 pour une porosité de 0,5 et 1%. Les indices indiquent l'âge apparent estimé pour chaque échantillon.

Chlore 36

Les nouveaux résultats en ^{36}Cl ont été placés dans le cadre conceptuel d'interprétation précédent présenté dans le rapport BRGM/RP-71281-FR. Les nouveaux résultats obtenus sur les eaux karstiques (P4 la Balme) et thermales (F5, F8, F9) sont très comparables aux résultats précédents (cf. Figure 42) ce qui permet de conforter le schéma interprétatif précédemment présenté. Les signatures des eaux thermales prélevées dans F9, F14, F5 et S12 se répartissent sur la courbe d'évolution théorique 3a qui décrit l'évolution de la signature ^{36}Cl dans un réservoir carbonaté initialement composé de 30 % d'eau de mer et de 70 % d'eau karstique ancienne de type « Pézenas » (âge ^{14}C de l'ordre de 6000 à 8000 ans, cf. BRGM/RP-71281-FR).

Les ouvrages DEMENT1 et DEMENT2 ont aussi été mesurés en ^{36}Cl . Les signatures de DEMENT1 sont proches des valeurs d'Ambressac (et intermédiaires des eaux de F4 et Cauvy). Cette position dans la Figure 42 suggère, comme précédemment pour Ambressac, un mélange entre le karst récent et des eaux thermales de type S12. De la même façon, DEMENT2 peut s'expliquer par un mélange entre des eaux karstiques récentes et des eaux thermales, par le couple P4 la Balme ($\approx 50\%$)-F9 ($\approx 50\%$) ou la Vène ($\approx 65\%$)-F8 ($\approx 35\%$). Le couple qui se rapproche le mieux des proportions de mélange estimées avec le strontium et le lithium (environ 55 % d'eau thermique et 45 % d'eau karstique) et permettant donc de mieux expliquer nos résultats est le binôme P4 la Balme-F9.

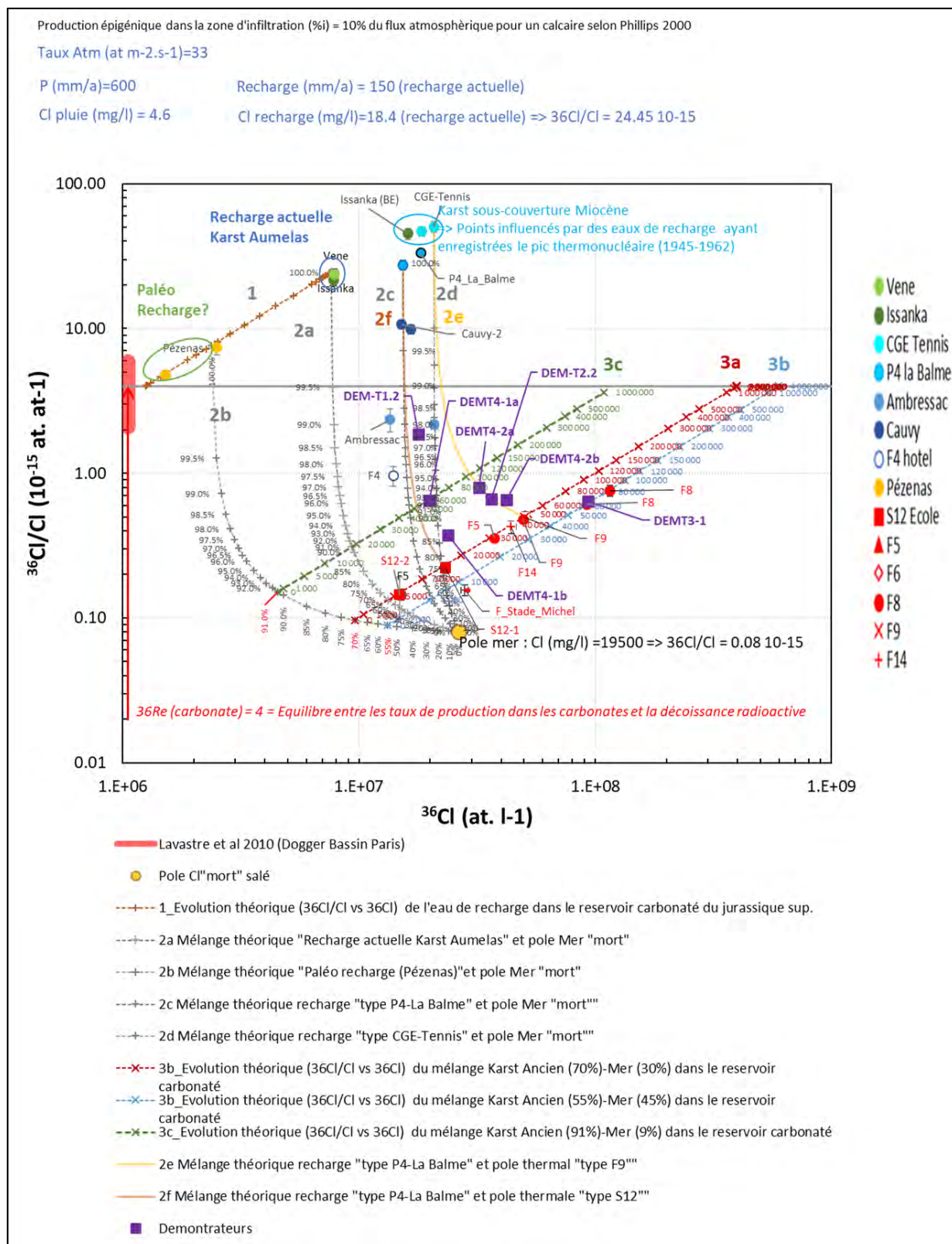


Figure 42: Evolution du rapport $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ en fonction des concentration en ^{36}Cl . Les différentes courbes théoriques d'évolution et de mélange du $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ vs ^{36}Cl sont représentées (voir BRGM/RP-71281-FR pour plus d'information). Pour le DEMENT4, le point « a » représente l'échantillon après 4 h de pompage et le point « b » après 24 h de pompage.

5.2. CARACTERISATIONS GEOCHIMIQUES DES OUVRAGES DEMENT1, DEMENT3 ET DEMENT4 PENDANT L'INVERSAC

5.2.1. Paramètres physico-chimiques et paramètres chimiques

Les données des températures, pH et conductivité et des éléments majeurs des ouvrages DEMENT1, DEMENT3 et DEMENT4 sont représentés en Figure 21, Figure 22, Figure 23, Figure 43 et en annexe A4.3.

Pour rappel, il est intéressant de comparer les résultats des forages DEMENT1 et F6 puisqu'ils sont localisés à quelques mètres l'un de l'autre, F6 permettant d'échantillonner et de caractériser les eaux sus-jacentes de DEMENT1 à proximité de l'interface Jurassique-Miocène.

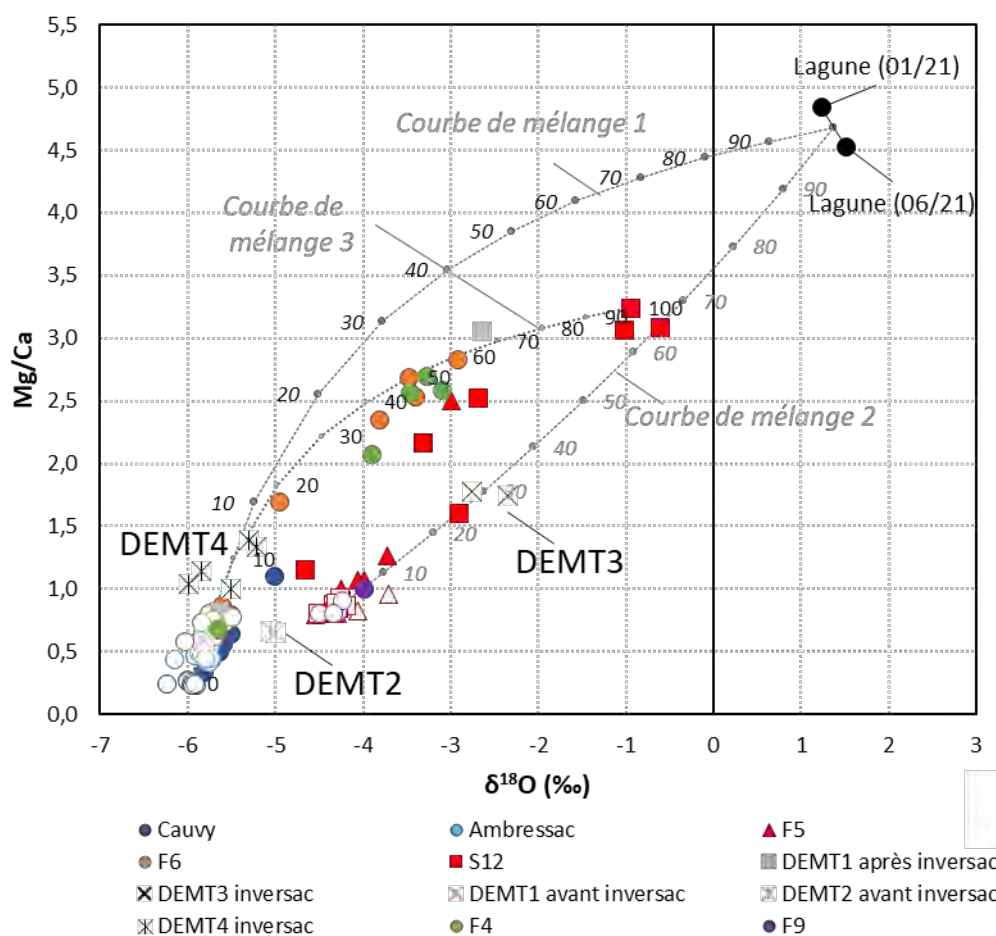


Figure 43: Rapport Mg/Ca en fonction de $\delta^{18}\text{O}$ des eaux étudiées sur la période 2018-2021. Les figurés vides correspondent aux prélèvements des campagnes spatiales et mensuelles i.e. en condition « normale » (2018-2020) et les figurés pleins aux prélèvements des campagnes liés à l'inversac (2020-2021). Les courbes grises 1 et 2 représentent les courbes d'évolutions théoriques des mélanges à deux pôles (Pôle karstique : moyenne des valeurs de Cauvy sur la période 2018-2020 ; Pôle thermique : moyenne des valeurs de F9 sur la période 2018-2019 ; pôle marin : valeur moyenne de la lagune prélevée en 2021). La courbe de mélange 3 correspond à un mélange théorique entre le pôle karstique et un pôle réservoir impacté par l'inversac, caractérisé par les eaux de S12 en fin d'inversac.

En période d'inversac, les eaux du forage DEMENT1 évoluent au cours du temps de la même manière que le forage F6, avec globalement une augmentation significative de la conductivité et des concentrations en éléments majeurs et une légère baisse de la température. La signature du DEMENT1 se rapproche des eaux de la lagune au cours du temps (Figure 21, Figure 22) mettant clairement en évidence l'impact du phénomène d'inversac sur les eaux du réservoir carbonaté. Dans le détail, ces résultats suggèrent plutôt une évolution vers les eaux de type « S12 » les plus impactées par l'inversac (pôle caractérisé par la droite de mélange 3 dans la Figure 43). Ce nouveau pôle « S12 », semblant être représentatif de la chimie des eaux de la presqu'île de Balaruc-les-Bains en période d'inversac, a été caractérisé dans la partie Sr et est composé de 62 à 68 % des eaux de la lagune, 20 à 31 % d'eaux thermales et 7 à 12 % d'eaux karstiques (partie 4.3.1).

En début du phénomène d'inversac (décembre 2020 et janvier 2021), les eaux de DEMENT1 présentent une plus forte conductivité et concentration en Cl que dans le forage F6. En considérant les valeurs initiales mesurées dans F6 et DEMENT1 avant l'inversac de mai 2020 (seul prélèvement de DEMENT1 avant l'inversac), il est possible d'estimer la proportion d'eau marine de type lagune ou de type « S12 » dans les échantillons (

Tableau 11). Les résultats mettent en évidence qu'à la même période d'échantillonnage (janvier 2021), les eaux de DMT1 sont plus impactées par un mélange avec des eaux saumâtres que les eaux de F6. Au vu de ces résultats, il semblerait que les eaux entrant par le gouffre de la Vise impactent les eaux en profondeur plus rapidement que latéralement témoignant d'une réorganisation des écoulements de la surface vers la profondeur compte tenu d'une densité plus importante des eaux de la lagune. Cette hypothèse est illustrée en Figure 44 (hypothèse 1a) et pourrait s'expliquer par les effets densitaires, l'eau saumâtre de la lagune étant plus dense que l'eau initialement présente dans le réservoir carbonaté, « plonge » préférentiellement vers la base du réservoir. Une autre hypothèse pour expliquer ces résultats serait que les eaux de la lagune qui s'infiltrent dans le réservoir en période d'inversac « pousse » une eau saumâtre préexistante dans le réservoir, provenant des précédents inversac (cf Figure 44, hypothèse 2).

Tableau 17: Estimation des apports d'eau marine de type lagune ou S12 dans une eau dont la concentration initiale est celle mesurée en F6 et DMT1 en mai 2020 (avant l'inversac), estimé via les concentrations en Cl.

	Pôle lagune (%)		Pôle S12 max (11/21) (%)	
	F6	DMT1	F6	DMT1
initial (27/05/2020)	0	0	0	0
04/12/2020	0	3	0	3
15/12/2020	10	-	12	-
08-11/01/2021	26	46	33	58
11/02/2021	32	-	40	-
29/06/2021	32	-	39	-
16/11/2021	39	-	49	-

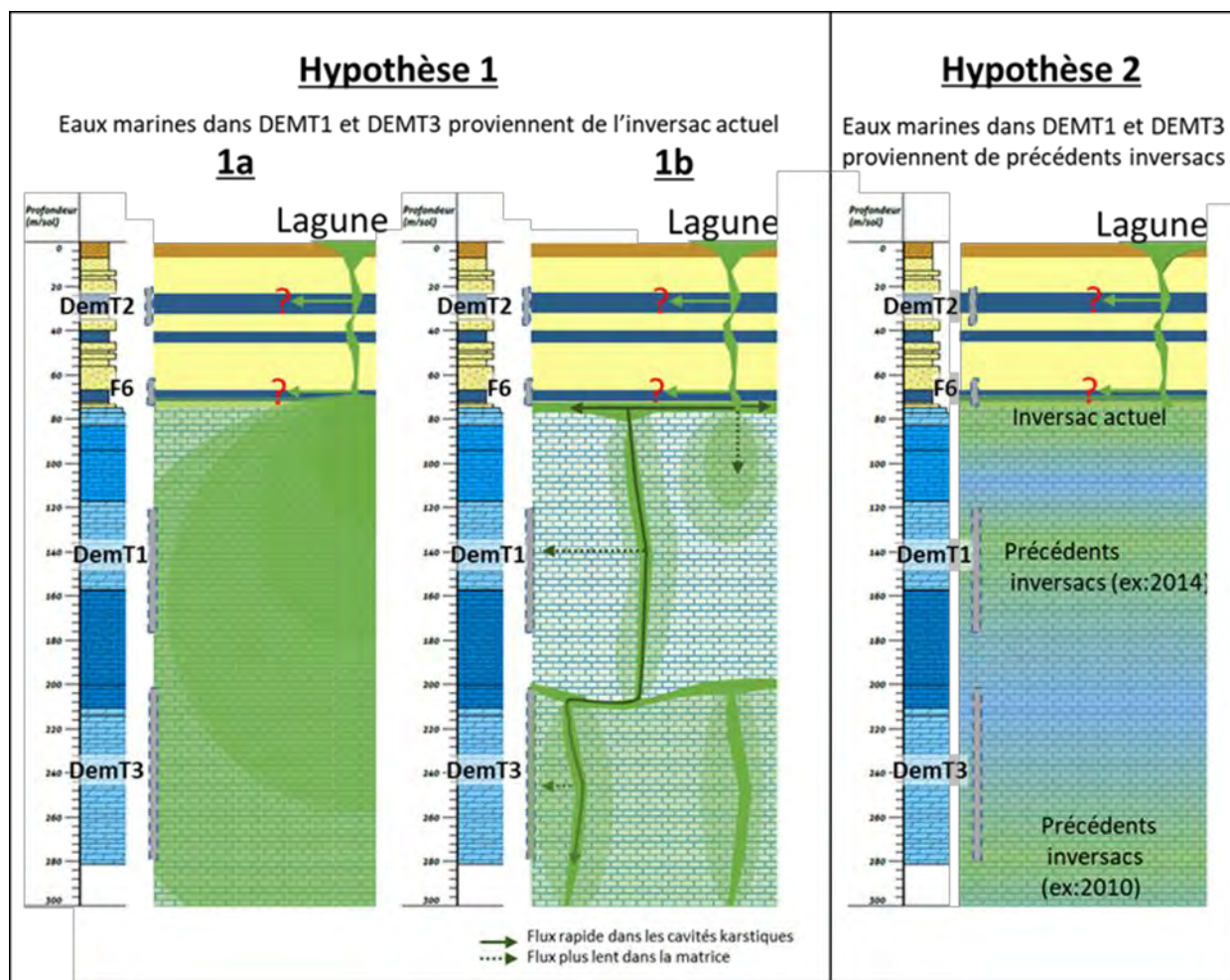


Figure 44 : Schéma de réflexion sur l'origine de la salinité dans les ouvrages F6, DEMENT1 et DEMENT3 prélevés au cours de l'inversac 2020-2022 sans considérer l'apport d'eau thermique.

Les eaux du forage DEMENT3 ont un faciès chloruré sodique et potassique, avec une signature qui se confond aux eaux de la lagune et aux eaux thermales sur le digramme de Piper (Figure 21). Les valeurs en conductivité et éléments majeurs de celui-ci sont similaires à celles des eaux de DEMENT1 et F6 durant l'inversac dans les figures Figure 23 et en annexe A4.3. La Figure 43 permet de mieux discerner les pôles de mélanges expliquant les signatures de DEMENT3, composé de 30% d'eau la lagune et de 70 % d'eau thermique sur cette représentation. Toutefois, comme pour DEMENT1, il n'est pas possible de savoir s'il s'agit d'eau marine de type lagune/mer actuel (hypothèse 1) ou ancienne/provenant des précédents inversacs (hypothèse 2) comme illustré en Figure 44. Une troisième hypothèse ici est qu'il peut s'agir d'un apport d'eau de la lagune actuelle par le bais de fracture connectée à la Vise (hypothèse 1b, Figure 43). Entre les prélèvements après 4 et 24h de pompage, les résultats mettent en évidence une augmentation de la conductivité et des éléments majeurs (et à une plus faible mesure du pH) et une légère baisse de la température. Ceci met clairement en évidence une évolution vers des eaux ayant une proportion de mélange plus importante avec des eaux marines (+ 4% à 24 h de pompage par rapport à 4 h de pompage).

Enfin, DEMENT4 a des valeurs physico-chimiques particulières. Dans le diagramme de Piper (Figure 21), DEMENT4 se démarque des autres eaux échantillonnées par des proportions en Mg plus importantes, en particulier en début de pompage. Après 24 h de pompage, les deux zones prélevées (entre 620 et 759 m et entre 390 et 759 m de profondeur) ont les mêmes signatures,

laissant supposées qu'un seul et même réservoir alimente le forage entre 390 et 759 m de profondeur lorsque les eaux de l'ouvrage sont longtemps mobilisées par pompage.

La position des points de l'ouvrage DEMENT4 dans la Figure 43 ainsi que dans le diagramme des isotopes stables de l'eau $\delta^2\text{H}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ (Figure 22b) indique que les eaux de DEMENT4 s'expliquent simplement par une dilution des eaux d'origine marine (mer/lagune). Le léger décalage sur les diagrammes binaires Na/Cl (Figure 22a), Mg/Cl ou SO_4/Cl traduit toutefois des processus d'interaction eau-roche spécifique à ce forage. En considérant un mélange entre une eau de pluie et une eau marine, DEMENT4 est composée entre 3 et 20 % d'eau marine de type mer (Tableau 18). Sur la base des connaissances actuelles, il n'est toutefois pas possible de déterminer qui des eaux de mer, de la lagune ou des eaux thermales est à l'origine de ces signatures.

La durée de pompage influence la chimie des eaux de DEMENT4, une nette augmentation de la salinité des eaux est observée (Figure 22). Sur les différentes représentations (Figure 23, Figure 44, annexe A4.3) les eaux semblent s'orienter vers un mélange avec les eaux marines. Dans ce cas, en considérant comme valeurs initiales les prélèvements après 4 h de pompage, les échantillons d'eaux seraient composés de 8 et 6 % d'eau marine de type lagune (en considérant les concentrations en Cl). Ceci pose la question de l'origine de ces eaux marines : s'agit-il d'eau récente/actuelle (hypothèse 1 en Figure 44) ou d'eau existante dans le système (hypothèse 2 en Figure 44) ?

Tableau 18: Estimation des proportions des eaux de mer dans le forage DEMENT4 estimé par les concentrations en Cl, Na et K, ainsi que l'apport d'eau marine (ici pôle lagune) ou thermale (pôle F9) lié au temps de pompage.

Nom	Proportion d'eau de mer dans eau de pluie (%)			Influence temps de pompage	
				Apport d'eau de la lagune (%)	Apport d'eau thermale (%)
	Cl	Na	K	Cl	Cl
DEMENT4-0	7	3	4		
DEMENT4-1 T0+4h	9	4	6		
DEMENT4-1 T0+24h	19	14	16	+ 8	+25
DEMENT4-2 T0+4h	12	7	9	+3 (+0)*	+7 (+0)*
DEMENT4-2 T0+24h	20	14	16	+ 9 (+6)*	+25 (+17)*

* le chiffre entre parenthèses correspond à l'apport d'eau par rapport au prélèvement après DEMENT4-2 T0+4h et non par rapport au premier prélèvement (DEMENT4-1 T0+4h)

5.2.2. Traceurs des contaminations de surface-flux de surface

Bactériologie et nitrates

Les ouvrages DEMENT1, DEMENT3 et DEMENT4 n'ont pas de contamination récente en coliformes fécaux et ont des concentrations en nitrates inférieures aux limites de quantifications. Aucune pollution en coliformes totaux n'a été enregistrée dans le forage DEMENT1 durant l'inversac. Etant donné que les eaux de DEMENT1 sont composées de 46 % d'eau de la lagune et que celle-ci est fortement contaminée par les coliformes (totaux et fécaux), il semble donc que ces bactéries soient très rapidement dégradées naturellement dans le système. L'absence de nitrates dans ces eaux va dans le même sens d'interprétation, suggérant l'existence de processus de dénitrification.

Contrairement au DEMENT1, les ouvrages DEMENT3 et DEMENT4 sont contaminés en coliformes totaux. Dans le détail :

- Le forage DEMENT3 a des concentrations de 118 UFC au bout de 4 h de pompage et 61 UFC au bout de 24 h.
- DEMENT4 a des concentrations en coliformes totaux comprises entre 2 et 19 UFC. En début de pompage (4 h) les valeurs sont les plus hautes avec 4 UFC pour le pompage profond et 19 UFC pour le pompage entre 390 et 760 m. Après 24 h de pompage, les eaux sont très faiblement contaminées (2 UFC).

La présence de coliformes dans ces eaux, même si les concentrations sont faibles, suggère l'existence de mélanges avec des eaux de surface récentes. Ceci ne peut être possible à de telles profondeurs que par le biais de fracture et/ou de drains karstiques bien connectées avec les horizons plus superficiels du réservoir au sein duquel des problèmes de contamination bactériologique ont été détectés dans cette étude. Cette interprétation est cohérente avec les interprétations hydrauliques des tests de pompage (BRGM/RP-70742-FR) qui montrent l'existence d'une alimentation par une ou des zones plus perméables (zones de failles perméables, conduits karstiques, etc.) situées à proximité des forages DEMENT3 et DEMENT4.

La diminution de la « charge bactériologique » observée au cours des pompages peut être interprétée par (1) une dégradation des bactéries plus importante (les eaux sont en conditions réductrices, favorables aux dégradations des coliformes, des nitrates et des CFC), et/ou (2) par un mélange avec une proportion d'eau récente moins contaminée.

COT et fluorescence naturelle

Les intensités totales de fluorescence mesurées durant la période d'inversac sur les différents ouvrages sont plus fortes que celles mesurées avant l'inversac (Figure 45). Il en est de même pour les eaux de la lagune ce qui indiquerait un impact de celles-ci sur l'ensemble de ces ouvrages de la presqu'île, à l'exception du forage DEMENT1 en décembre 2020, ouvrage peu impacté par des mélanges avec la lagune à cette période. Ce résultat est en cohérence avec les observations mises en évidence avec l'étude des nitrates et de la bactériologie et suggère l'existence de mélanges avec des eaux de surfaces récentes. A noter toutefois que les intensités de fluorescence, les proportions de composés organiques de types humiques et protéiques, ainsi que les teneurs en COT restent globalement dans la gamme de ce qui a été observée sur les différents forages thermaux en mars et août 2018 (hors inversac). Par conséquent l'impact de cet épisode d'inversac sur les forages de la plateforme scientifique expérimentale peut être considéré comme faible au regard de ces traceurs.

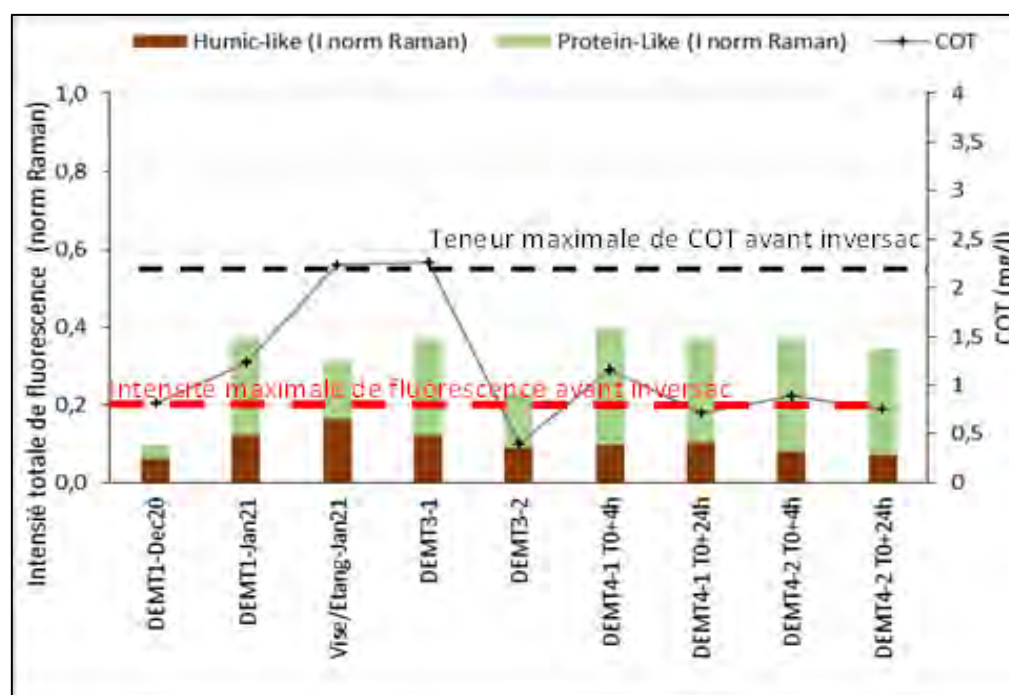


Figure 45: Proportion des composés organiques de types humiques et de types protéiques et teneurs en COT des forages de la plateforme scientifique expérimentale et de la lagune (à la Vise) durant l'inversac.

5.2.3. Evolution des signatures isotopiques durant l'inversac

Isotopes du Strontium

Composé essentiellement d'eau karstique en période normale (95 % contre 4 % d'eau thermique), l'inversac provoque en DMT1 une augmentation de la contribution relative du pôle thermique au dépens des eaux karstiques (90 % d'eau karstique et 10 % d'eau thermique) (Figure 46). Ainsi, dans un premier temps, la réorganisation des flux d'eau au niveau de DMT1 se fait suivant une direction Sud-Nord. Dans un deuxième temps, les eaux marines de la lagune atteignent DMT1 en profondeur (128 m – 160 m de profondeur).

En janvier 2021 (41 jours après le début de l'inversac), la contribution relative des eaux de la lagune représente jusqu'à 42 % des eaux de DMT1, la part karstique représente de l'ordre de 48 %, la proportion d'eau thermique demeurant constante à environ 11 %. A cette même période d'échantillonnage, les ouvrages F4, F6 et F5 sont composés de 21 %, 24 % et 2 % respectivement d'eau marine issue de la lagune (Figure 29).

Tableau 19: Proportion d'eau à trois pôles des eaux de DMT3 dans le cas d'un mélange entre un pôle karstique récent (CGE tennis), un pôle thermique (F9) et un pôle marin de type lagune.

Nom	Date	Pôle karstique récent (%)	Pôle thermique (%)	Pôle marin (%)
		CGE Tennis 03/2018	F9 03/18	Lagune de Thau 2021
DMT3-1	11/01/2021	56	14	30
DMT3-2	12/01/2021	51	15	34

La première eau échantillonnée au forage DEMENT3 est composée d'environ 56 % d'eau karstique (Tableau 19), 30 % d'eau de la lagune et 14 % d'eau thermique. L'augmentation de la minéralisation au cours du pompage (Figure 46) s'explique par une augmentation de la proportion d'eau de la lagune (de 30 à 34 %) liée à une diminution de la contribution des eaux karstiques (de 56 à 51 %).

Les eaux du DEMENT4 prélevées dans le Jurassique moyen en début de pompage (DEMENT4-1 T+4h) présentent des signatures en $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de $0,70759 \pm 0,00005$, c'est-à-dire les plus basses jamais mesurées sur la zone d'étude (Figure 46). Les eaux de cet ouvrage se démarquent également par des concentrations en Sr très élevées, 2 à 3 fois supérieures à celles mesurées dans la lagune et les forages thermaux respectivement. De telles valeurs ne peuvent s'expliquer que par une dissolution plus importante de carbonate en contexte carbo-gazeux (apport de CO_2 provenant du socle sous-jacent). **Le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des eaux du DEMENT4-1-T+4h sont les plus représentatives des carbonates en profondeur.**

L'importance des concentrations en strontium des eaux du DEM-T4 rend difficile la caractérisation de processus secondaires tels que les phénomènes de mélange avec des eaux de la lagune et/ou avec les eaux thermales (Figure 46). Autrement dit, un apport d'eau de la lagune ou d'eau thermique dans cet ouvrage ne modifierait pas significativement les signatures Sr.

Au cours des opérations de pompage (entre 620 et 759 m de profondeur et entre 390-759 m de profondeur), les signatures en strontium ont évolué (augmentation du rapport isotopique $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) et les concentrations en Sr ont diminué. Il n'est toutefois pas possible sur la base de ces résultats de préciser avec certitude quel est la signature de l'eau avec laquelle les eaux de DEMENT4 se mélangent. Il est donc proposé de considérer plusieurs pôles de mélange, en considérant le premier prélèvement comme le plus représentatif du système (et de la matrice carbonatée):

- Un mélange entre un pôle karstique profond (DEMENT4), un pôle karstique récent (CGE tennis) et un pôle marin de type lagune (hypothèse 1)
- Un mélange entre un pôle karstique profond (DEMENT4), un pôle thermal (F9) et un pôle marin de type lagune (hypothèse 2).

Les résultats des proportions de mélange sont donnés dans le tableau suivant (Tableau 20).

Tableau 20: Proportion d'eau à trois pôles des eaux de DEMENT4 dans le cas d'un mélange entre un pôle karstique profond (DEMENT4), un pôle karstique récent (CGE tennis) et un pôle marin de type lagune (hypothèse 1) ou un pôle karstique profond (DEMENT4), un pôle thermal (F9) et un pôle marin de type lagune (hypothèse 2).

		Proportion (%)		
Nom	Date	<u>Pôle karstique peu profond</u>	Pôle karstique profond	Pôle marin
Hypothèse 1		<u>CGE Tennis 2018</u>	DEMT4-1 (4h)	Lagune de Thau 2021
DEMT4-1 T0+4h	15/11/2021	0,0	100	0,0
DEMT4-1 T0+24h	16/11/2021	9,7	82,1	8,2
DEMT4-2 T0+4h	17/11/2021	5,3 (0)*	93,2 (100)*	1,5 (0)*
DEMT4-2 T0+24h	18/11/2021	8,9 (4,2)*	82,4 (88,4)*	8,7 (7,4)*
		<u>Pôle thermal</u>	Pôle karstique profond	Pôle marin
Hypothèse 2		<u>F9 2018</u>	DEMT4-1 (4h)	Lagune de Thau 2021
DEMT4-1 T0+4h	15/11/2021	0,0	100,0	0,0
DEMT4-1 T0+24h	16/11/2021	16,6	80,2	3,1
DEMT4-2 T0+4h	17/11/2021	9,1 (0)*	92,2 (100)*	-1,3 (0)*
DEMT4-2 T0+24h	18/11/2021	15,2 (7,2)*	80,7 (87,5)*	4,1 (5,3)*

* le chiffre entre parenthèses correspond à l'apport par rapport au prélèvement après DEMENT4-2 T0+4h et non par rapport au premier prélèvement (DEMENT4-1 T0+4h)

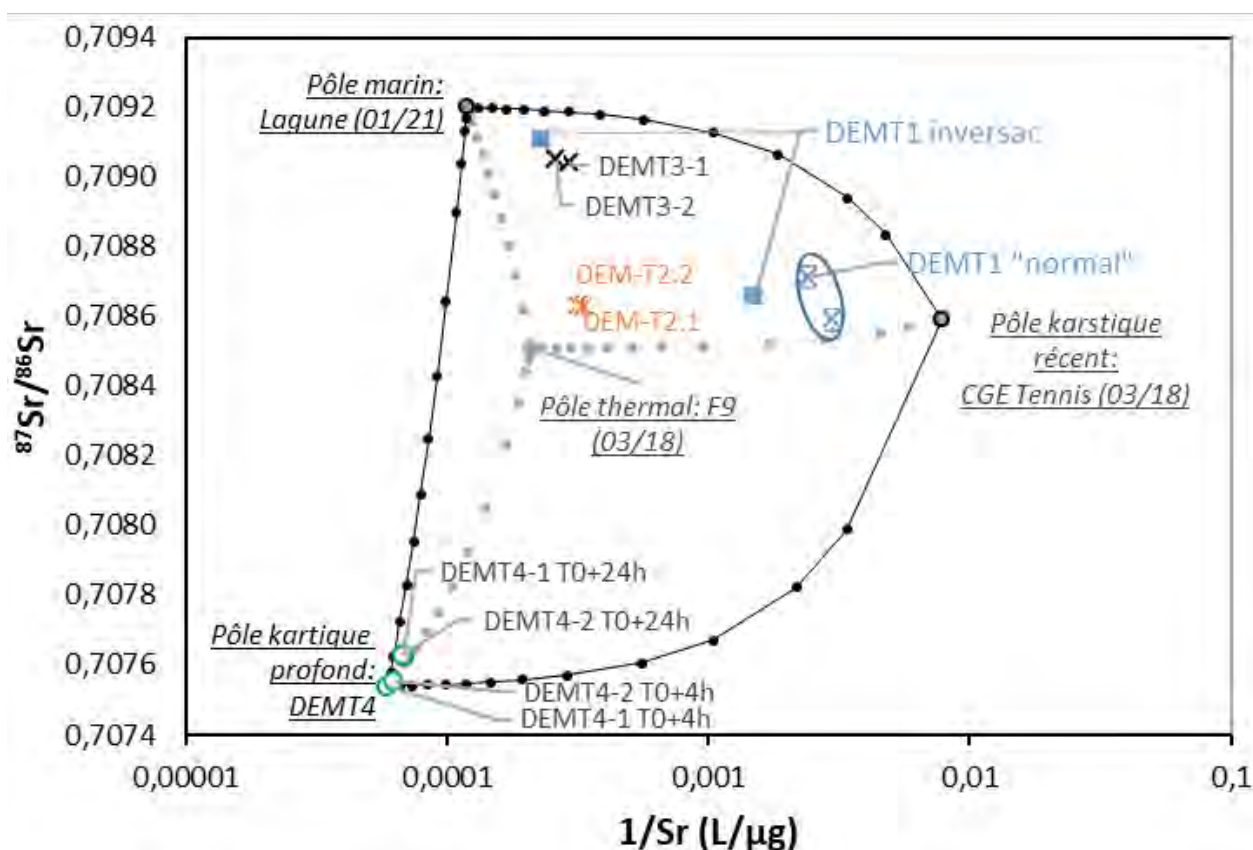


Figure 46 : Rapport isotopique $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en fonction de l'inverse de la concentration en Sr en période d'inversac des forages DEMT1 ap. (pendant l'inversac), DEMT3 et DEMT4. DEMT2 et DEMT1 av. (avant inversac) sont aussi représentés à titre comparatif. Les évolutions des signatures des eaux de DEMT4 pendant l'essai de pompage peuvent être interprétées par un mélange à trois pôles DEMT4 initial-lagune-pôle karstique ou par un mélange DEMT4 initial-lagune-pôle thermal.

Isotopes du Lithium

Les résultats des concentrations en lithium et des rapports isotopiques ($\delta^7\text{Li}$) des différents ouvrages sont présentés en annexe 2 (Tableau A2.13) et illustrés en Figure 47.

Les eaux de la lagune échantillonnées lors de l'inversac en 2021 présentent des concentrations en lithium proche de celles mesurées en 1998 et 2010.

Les concentrations en lithium de DEMT1 durant l'inversac augmentent avec le temps et évoluent vers la signature des eaux de la lagune. La signature isotopique $\delta^7\text{Li}$ n'a pas été analysée.

Sur la Figure 47, les signatures des eaux de DEMT3 et DEMT4 ne se positionnent pas sur la droite de dilution des eaux de mer (contrairement à DEMT1 prélevé en période d'inversac), le même constat est fait pour les eaux thermales. Ces résultats indiquent que les eaux sont enrichies en lithium. Dans le cas des eaux thermales, puisque les concentrations en lithium dans les roches carbonatées sont négligeables, il a été proposé que l'apport en lithium est dû à un apport d'un flux d'eau provenant du socle granitique (BRGM/RP-71281-FR). Ce flux apporte environ 70 % du lithium des eaux thermales.

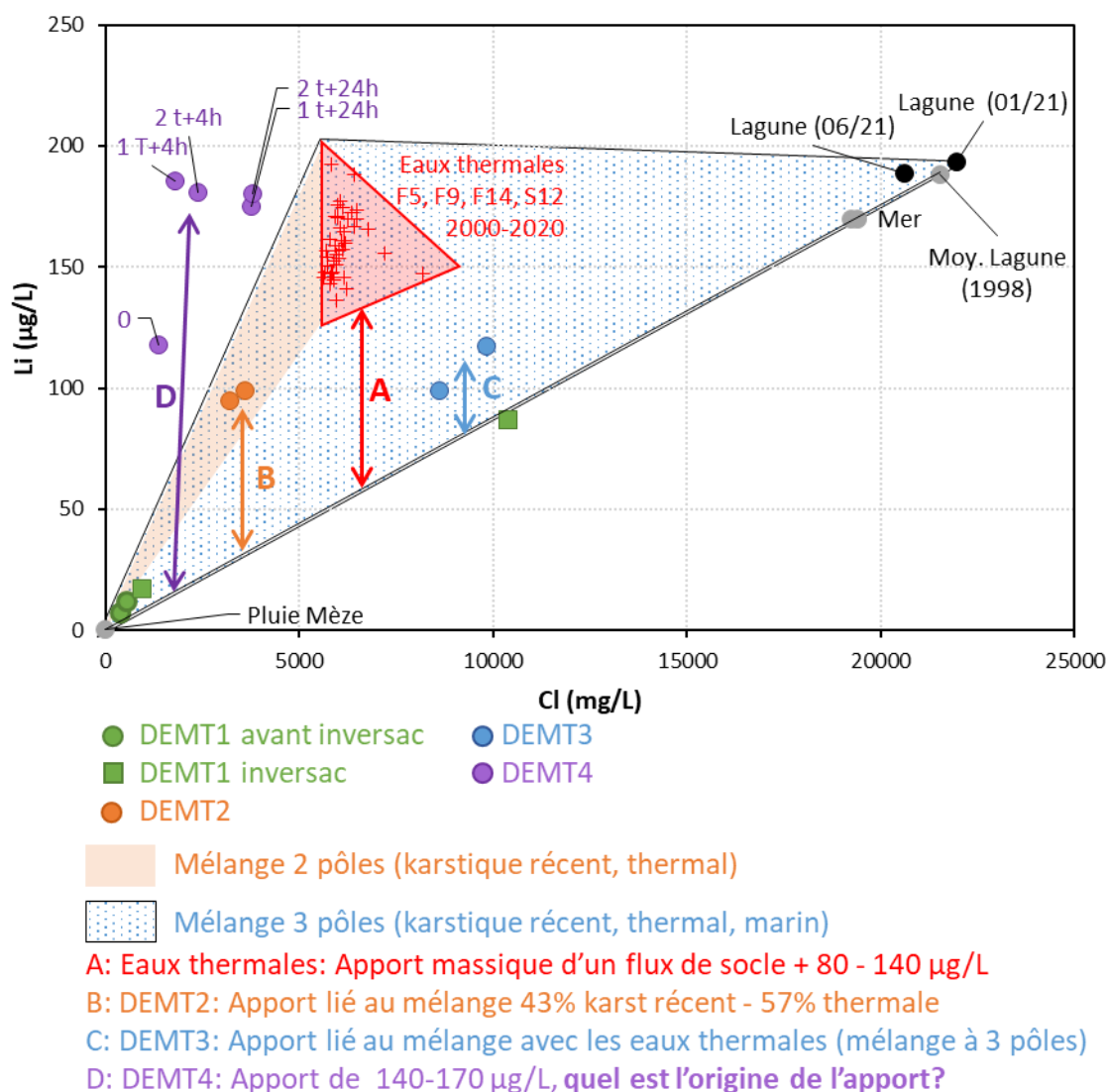


Figure 47: Concentrations en lithium et chlorures des eaux des forages DEMENT1, DEMENT2, DEMENT3 et DEMENT4. L'origine de l'apport en lithium est présentée (A-D).

L'excès de lithium dans le DEMENT3 (Figure 47) peut s'expliquer par un mélange avec les eaux thermales. Les résultats isotopiques en lithium des eaux de DEMENT3 confirment que ces eaux sont un mélange entre des eaux karstiques, des eaux thermales et des eaux de la lagune. En considérant les proportions de mélange estimées avec le strontium (56 % d'eau karstique, 29 % d'eau de la lagune et 15 % d'eau thermique) et en utilisant les concentrations des pôles représentatifs ([Li] CGE tennis = 1 µg/L, [Li] F9 = 171 µg/L et [Li] lagune = 245 µg/L), la concentration théorique en Li dans le forage DEMENT3 est de 97 µg/L. Ceci est cohérent avec la valeur mesurée (98 µg/L) ce qui confirme a posteriori nos hypothèses concernant le choix des pôles.

Les excès en lithium des eaux du forage DEMENT4 (Figure 47) par rapport à la droite de dilution des eaux de mer sont bien plus importants que pour les eaux thermales, questionnant l'origine du lithium dans ces eaux. Si on accepte l'idée que les excès en lithium sont due à des mélanges avec des fluides minéralisés issus du socle, les signatures en lithium des eaux du DEMENT4 proviendrait pour 90 % du socle, ces apports seraient alors bien plus importants que ceux estimés pour les eaux thermales (environ 70 %).

Une autre hypothèse pourrait également être avancée pour expliquer les concentrations en lithium. Par exemple, des processus d'interaction eau-roche spécifique au sein de la formation et/ou au niveau de l'interface avec les marnes du Lias sous-jacente au réservoir du Jurassique moyen pourrait peut-être expliquer les teneurs en lithium mesurées (ainsi que la signature isotopique du strontium) et permettrait également de justifier le déficit de certains des éléments majeurs. **Des analyses minéralogiques sur certains des horizons profonds de la carotte pourraient donner des premiers éléments de réponse.** Enfin, il n'est pas possible d'exclure que les fortes concentrations en lithium soient le résultat combiné des interactions eau-roche au sein du réservoir et d'un apport externe issue du socle comme évoqué précédemment.

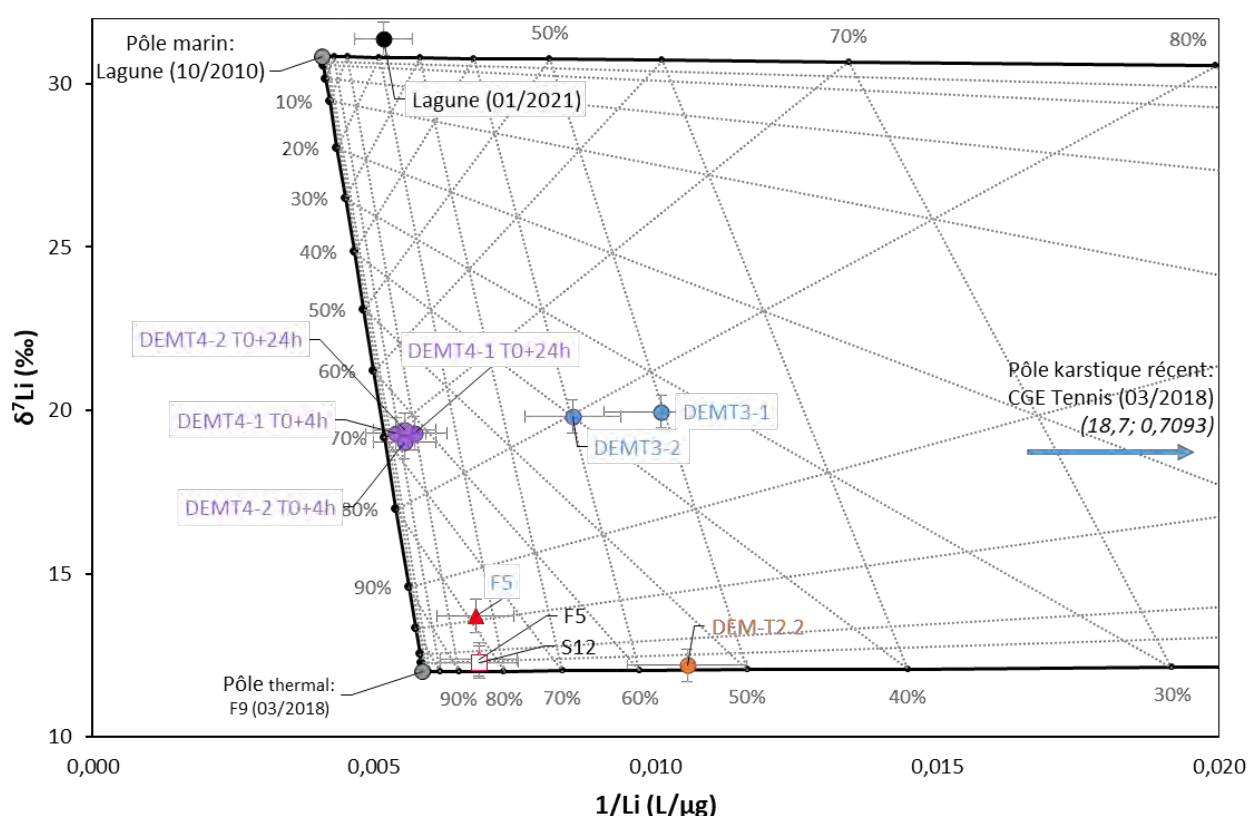


Figure 48: Signature isotopique $\delta^7\text{Li}$ en fonction de l'inverse de la concentration en Li en période d'inversac des forages DEMENT3 et DEMENT4. DEMENT2 est aussi représenté à titre comparatif.

Tableau 21 : Contribution relative des pôles de mélange (cf. Figure 48)

Echantillon	Date	$\delta^7\text{Li}$	Li ($\mu\text{g/l}$)	Pôle karstique (%)	Pôle thermal (%)	Pôle lagune/mer (%)
				CGE Tennis (2018)	F9 (2018)	Lagune (2010)
DEMT3-1	11/01/2021	19,96	14,4	49,8	33,2	17,0
DEMT3-2	12/01/2021	19,81	17,0	40,2	40,0	19,8
DEMT4-1 T0+4h	15/11/2021	19,29	26,9	4,0	66,7	29,4
DEMT4-1 T0+24h	16/11/2021	19,30	25,4	9,6	62,7	27,7
DEMT4-2 T0+4h	17/11/2021	19,03	26,2	6,1	66,3	27,5
DEMT4-2 T0+24h	18/11/2021	19,41	26,1	7,0	64,0	29,0

Concernant les signatures isotopiques du lithium (Figure 48), les signatures des eaux de DEMT4 apparaissent intermédiaires à celles mesurées pour les eaux thermales et pour les eaux marines (lagune/mer). Cette signature questionne puisque, dans l'hypothèse d'une importante contribution d'eau du socle, comme le laisse suggérer les fortes concentrations en Li (90 %), les signatures du DEMT4 auraient dû être appauvries en ^7Li , et donc présenter des signatures $\delta^7\text{Li}$ bien plus faibles puisque les signatures du pôle socle sont généralement comprises entre -5 et +10 ‰ (Milot, 2013). Nous avons cherché à creuser cette piste :

- Si on considère que l'apport en concentration du lithium est dû à un flux granitique, et en considérant que les eaux de DEMT4 sont composées de 10 à 20 % d'eau marine ayant une signature $\delta^7\text{Li}$ actuelle ($\delta^7\text{Li}=31$ ‰), alors il faudrait que le socle ait une signature $\delta^7\text{Li}$ comprise entre -30 et -50 ‰, hors les granites d'après les informations de la littérature ont des valeurs $\delta^7\text{Li}$ généralement comprises entre -5 et +10 ‰.
- Le même scénario a été testé avec des valeurs en $\delta^7\text{Li}$ d'une mer plus ancienne. Peu de publication existe sur les valeurs en $\delta^7\text{Li}$ des eaux de mer ancienne. Hathorne et James (2006) ont montré que les eaux de mer ont varié entre 31 et 26 ‰ sur les 20 Ma. En considérant la valeur la plus basse de 26 ‰, il faudrait une valeur de socle comprise entre -15 et -40 ‰. De la même manière que précédemment, de telles valeurs n'ont pas été enregistrées dans la littérature.

Ces résultats laissent suggérer qu'il n'existe pas une source unique de lithium et que les excès en lithium des eaux de DEMT4 ne sont pas uniquement liés à des flux de socle.

Une nouvelle piste de travail est en cours de réflexion : il s'agit de considérer les effets de la température du réservoir sur les concentrations et le $\delta^7\text{Li}$ des eaux. En effet, il a été prouvé dans la littérature (ex. : Milot et al., 2010) que l'augmentation de la température fractionne le $\delta^7\text{Li}$ (diminution du $\delta^7\text{Li}$) et augmentent les concentrations. Ce travail de recherche n'a pas pu être abordé dans le cadre de ce projet.

Isotopes du Bore

Les concentrations en bore de DEMT1 en période d'inversac augmentent avec le temps et se place sur la droite de dilution des eaux de mer (Figure 49). De la même façon, les résultats isotopiques en $\delta^{11}\text{B}$ de cet ouvrage se rapproche des signatures des eaux marines. Ainsi, en période d'inversac, l'évolution des signatures en bore s'explique simplement par un apport de plus en plus important d'eau de la lagune, confirmant les résultats précédents.

Les concentrations en Cl et B du forage DEMENT3 se placent sur la droite de dilution des eaux de mer ce qui permet a priori d'exclure le fractionnement chimique (B/Cl) lié au phénomène d'interaction eau-roche avec les minéraux argileux comme évoqué pour les eaux thermales. Cela signifie que les concentrations de ces éléments s'expliquent principalement par un apport d'eau marine.

Les signatures en $\delta^{11}\text{B}$ de DEMENT3 peuvent s'expliquer par un mélange d'environ 60 % d'eaux karstiques et 40 % d'eaux marines. Les résultats en $\delta^{11}\text{B}$ ne permettent pas de mettre en évidence un mélange avec les eaux thermales échantillonnées dans les forages de la presqu'île de Balaruc-les-Bains contrairement aux isotopes du strontium (contributions évaluées à 15 % pour l'eau thermale, 29 % pour la lagune et 56 % pour la composante d'eau karstique). Les résultats des isotopes du bore et l'absence de fractionnement du rapport B/Cl par rapport à la droite de dilution des eaux marines laissent suggérer que la part d'eau thermale qui contribue au mélange des eaux de DEMENT3 n'a pas encore interagit avec des argiles et/ou de la matière organique présente au toit du réservoir Jurassique. Cette contribution d'eau thermale proviendrait donc d'une zone plus profonde que celle mobilisée par les forages thermaux de la presqu'île (F5, F9, F14), comme proposée pour DEMENT1.

Enfin, les concentrations en Cl et B du forage DEMENT4 mettent en évidence un déficit de bore par rapport à la droite de dilution des eaux de mer suggérant l'existence de processus d'adsorption du bore sur les horizons marneux et/ou argileux au sein du réservoir. Ce processus d'adsorption du B n'a pas été détecté dans les eaux du forage DEMENT3.

La signature $\delta^{11}\text{B}$ du forage DEMENT4, et en particulier en début de pompage (T0+4h) apparaît appauvrie en ^{11}B et est trop faible pour être expliquée simplement par un mélange entre les eaux douces de type CGE Tennis et les eaux marines (Figure 49). Le processus d'adsorption du B mis en évidence à l'aide du rapport B/Cl devrait se traduire par un enrichissement en ^{11}B des eaux par rapport à la droite de mélange entre l'eau marine et l'eau du karst (courbe noire, Figure 49), or c'est l'inverse qui est observé. Pour expliquer ces valeurs en considérant les processus de mélange, plusieurs hypothèses peuvent être proposées. Si l'on suppose que la signature des eaux résulte d'un mélange à 2 composantes, il faudrait que le nouveau pôle de mélange soit appauvri en ^{11}B ($\delta^{11}\text{B} = -25\text{‰}$ si la concentration en bore est comparable à celle de CGE tennis) ou au contraire présentant des concentrations en bore plus élevées (environ 100 $\mu\text{g/L}$) si l'on conserve la signature $\delta^{11}\text{B}$ des eaux karstiques mesurées dans le forage CGE-Tennis (borne basse, $\delta^{11}\text{B} = 24\text{‰}$). Les données isotopiques disponibles sur les eaux karstiques de la zone d'étude ne permettent pas de justifier ces hypothèses. Précédemment, à l'aide du lithium, il a été suggéré que les eaux du réservoir profond pouvaient être sous l'influence d'eau provenant du socle granitique sous-jacent. Selon les informations de la littérature, les signatures $\delta^{11}\text{B}$ du bore des granites¹ sont appauvries (Négre et al, 2004). Les signatures $\delta^{11}\text{B}$ du forage DEMENT4 sont compatibles avec l'hypothèse de l'influence d'eau provenant du socle granitique sous-jacent. Toutefois, le bore étant par la suite remobilisé par des processus d'échange avec la matière organique et/ou les sédiments argileux, il n'est pas possible de confirmer cette hypothèse ni de voir cet effet sur les eaux profondes (DEMENT4) ou sur les eaux thermales (F5, F9). **Des analyses minéralogiques et isotopiques sur certains des horizons profonds de la carotte de DEMENT4 pourraient donner de premiers éléments de réponse.**

¹ Le bore est présent dans les roches silicatées avec des teneurs moyennes qui avoisinent 10 mg/kg et des $\delta^{11}\text{B}$ variant entre - 5 et + 6 ‰. Toutefois en fonction de l'abondance en tourmaline, minéral très riche en bore, dans les roches, des valeurs plus variables du $\delta^{11}\text{B}$ peuvent être observées (de - 20 à + 20 ‰)

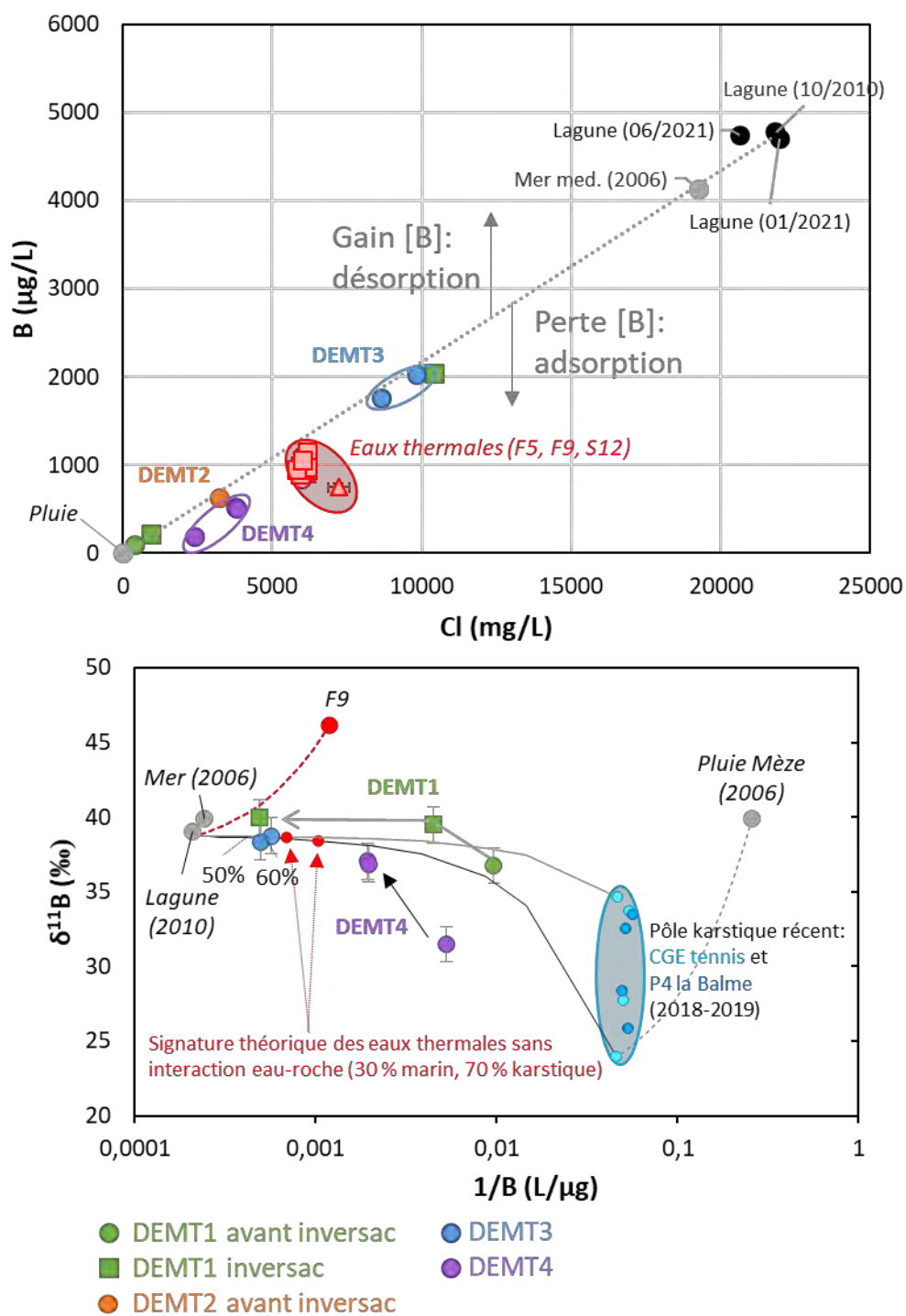


Figure 49: Evolution des concentrations du B en fonction du Cl des eaux des forages de la plateforme scientifique expérimentale (en haut) et du $\delta^{11}\text{B}$ en fonction de l'inverse de teneur en bore (en bas).

5.2.4. Datation

Gaz dissous (Ar, Ne, He)

Comme précisé précédemment (partie 4.4.1), l'estimation des températures de recharge et de l'excès d'air avec les concentrations en Ar et Ne ainsi que l'estimation des temps de résidence des eaux par la méthode He n'a pas pu être réalisé dans le cadre de ce projet, ce travail dépassant le cadre du projet DEM'Eaux Thau et nécessitant une recherche plus approfondie.

En complément, l'estimation des âges Hélium de DEMENT4 est confronté à différents verrous :

- L'excès d'air, information nécessaire pour mieux contraindre la proportion d'He produit dans la roche (et donc l'âge des eaux) n'est pas connu.
- Le taux de production, estimé principalement sur la base des concentrations en uranium et thorium dans la matrice carbonatée, n'est pas encore connu dans la lithologie traversée par le DEMENT4 (les diagraphies Gamma Ray spectrales sont en cours de dépouillement). Utiliser le taux de production estimé pour les eaux de Pézenas (Jurassique supérieur) n'est ici pas cohérent puisqu'il ne s'agit pas de la même matrice carbonatée (Jurassique moyen), induisant une grande erreur sur les âges hélium.
- Il n'existe pas, à la date de l'écriture de ce présent livrable, d'information sur la porosité efficace des roches traversée par DEMENT4, la porosité étant le paramètre le plus sensible dans l'estimation des âges hélium.
- Enfin, le lithium et le CO₂ mettent en évidence un mélange avec des eaux provenant du socle sous-jacent. L'estimation des proportions d'hélium apporté par ce flux reste un verrou à ce stade.

Gaz anthropiques

Les données des concentrations en CFC mesurées en pmol/L puis converties en pptv sont reportées en annexe 2 (Tableau A2.16), et illustrées en Figure 34, Figure 35 et en annexe 4.5. En contexte d'inversac, il a été montré que les eaux des ouvrages DEMENT1 et DEMENT3 sont impactés par un mélange avec les eaux de la lagune. Il a donc été choisi pour convertir les concentrations en CFC, comme en partie 4.4.2, d'estimer les températures de recharge sur la base de la proportion d'eau de la lagune, les températures de la lagune lors du prélèvement et les températures de recharge estimées dans le système (température de recharge moyenne de 15°C pour les eaux karstiques actuelles et une température de 13 °C eaux karstiques anciennes pour les eaux thermales, voir Ranchoux et al., BRGM/RP-71281-FR pour plus d'information). Les températures de recharge estimées pour les forages de la plateforme scientifique expérimentale sont présentées dans le tableau suivant (Tableau 22).

Tableau 22. Estimation des températures de recharge sur la base des proportions d'eau de la lagune, la température de la lagune et la température de recharge représentative des différentes masses d'eau des forages de la plateforme scientifique expérimentale.

Date	Echantillon	Température mesurée à la lagune (°C)	Température système recharge (°C)	Proportion eau lagune (%)	Température de recharge estimée (°C)
04/12/2020	DEMT1	8,6	15	3	14,8
08/01/2021	DEMT1	4,9	15	46	10,3
11/01/2021	DEMT3-1	4,9	14	38	10,5
12/01/2021	DEMT3-2	4,9	14	44	10,0
15/11/2021	DEMT4-1 T0+4h	12,9	13	7	13,0
16/11/2021	DEMT4-1 T0+24h	12,9	13	16	13,0
17/11/2021	DEMT4-2 T0+4h	12,9	13	9	13,0
18/11/2021	DEMT4-2 T0+24h	12,9	13	16	13,0

L'évolution des signatures en gaz des eaux de DEMT1 tend globalement vers les eaux actuelles de la lagune. Il apparaît donc que la première hypothèse illustrée en Figure 44 soit la plus représentative du système. Les eaux denses de la lagune, une fois infiltrée, « plongent » dans le réservoir et modifient en profondeur la chimie des eaux jusqu'au moins la zone entre 128 - 178 m de profondeur (zone de prélèvement du forage DEMT1).

Les concentrations en CFC des forages DEMT3 et DEMT4 sont faibles mais non négligeables, mettant en évidence des mélanges avec des eaux récentes (antérieurs à 70 ans).

L'essai de pompage de DEMT3 induit une diminution des concentrations en CFC, associée comme vu précédemment à une diminution des coliformes totaux (et du TOC) et une augmentation de la conductivité (et légèrement de la température). Ceci indique que les proportions de mélange avec les eaux de surface (lagune infiltrée et/ou karstique) diminuent et que l'échantillon prélevé après 24 h de pompage a probablement une proportion de mélange plus importante avec des eaux plus anciennes et/ou moins contaminées par ces gaz. Ce résultat apparaît cohérent avec les résultats précédents : les isotopes du strontium montrent que la proportion d'eau thermal augmentait au cours du pompage.

La présence de CFC en début de pompage dans l'ouvrage DEMT4 met en évidence un mélange avec des eaux de surface probablement par le biais de fractures et/ou de cavités karstiques. Les teneurs en CFC diminuent ensuite lors du pompage indiquant que les eaux mobilisées sont de moins en moins influencées par des eaux récentes (inférieur à 70 ans).

Tableau 23. Valeurs en CFC des eaux échantillonnées dans les forages DEMT1, DEMT3 et DEMT4 pendant l'inversac

Date	Nom	SF6 (pptv)	CFC-12 (pptv)	CFC-11 (pptv)	CFC-113 (pptv)
04/12/2020	DEMT1	Problème analytique	399	1188	53
08/01/2021	DEMT1		498	723	49
11/01/2021	DEMT3-1		79	35	16
12/01/2021	DEMT3-2		24	12	5
15/11/2021	DEMT4-1 T0+4h	15	28	7	238
16/11/2021	DEMT4-1 T0+24h	5	48	8	11
17/11/2021	DEMT4-2 T0+4h	2	30	65	10
18/11/2021	DEMT4-2 T0+24h	3	32	8	6

Tritium

Les forages DEMENT3 et DEMENT4 ont des valeurs de tritium inférieures aux limites de détection (< 1,0 UT), indiquant que les eaux mobilisées par le pompage sont globalement anciennes (supérieures à 70 ans) et que la signature de la contribution des horizons du Jurassique supérieur sus-jacent mis en évidence avec les CFC et les bactéries présentent de très faibles valeurs en tritium.

Carbone 14

Les résultats des eaux des précédentes campagnes ont été interprétés dans le rapport BRGM/RP-71281-FR (Ranchoux et al., 2022). Les nouveaux résultats ne concernent que le forage DEMENT4. Les ouvrages DEMENT1, DEMENT2 et DEMENT3 n'ont pas été échantillonnés pour les analyses en ^{14}C car il y avait des preuves de mélange avec les eaux thermales, apportant du CO_2 et contaminant le signal de ^{14}C et $\delta^{13}\text{C}$ (BRGM/RP-71281-FR).

Les activités ^{14}C des eaux de DEMENT4 sont comprises entre 0,5 et 5,7 pmC avec des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ comprises entre -1,7 et -5,1‰ (Figure 50). Le premier prélèvement (DEMENT4-1 après 4 h de pompage, mobilisant les eaux entre 620 et 760 m de profondeur) se démarque des autres avec des signatures en ^{14}C de 0,5 pmC et en $\delta^{13}\text{C}$ de -1,7 ‰. Cette signature correspond au signal de la matrice carbonatée. Ceci suggère une forte interaction avec la roche encaissante, comme le suggéraient précédemment les fortes concentrations en Sr. Le prélèvement DEMENT4-2 t0+4h, mobilisant les eaux entre 390 et 760 m, a des signatures en ^{14}C de 2,2 pmC et en $\delta^{13}\text{C}$ de -4,6 ‰. Cette signature peut s'expliquer par un apport important de CO_2 mantellique (encadré rouge sur la Figure 50), en cohérence avec la forte présence de Li dans l'ouvrage. Enfin, les prélèvements après 24 h de pompage ont des signatures très poches (points confondus sur la Figure 50), avec des valeurs en ^{14}C de 5,7 pmC et en $\delta^{13}\text{C}$ de -5,1‰. Les tendances observées entre 4 et 24 h de pompage montre un mélange avec des eaux dont les valeurs en ^{14}C sont plus hautes (et plus négative en $\delta^{13}\text{C}$). L'âge apparent de ces eaux est donc plus récent, indiquant un mélange avec eaux plus récentes.

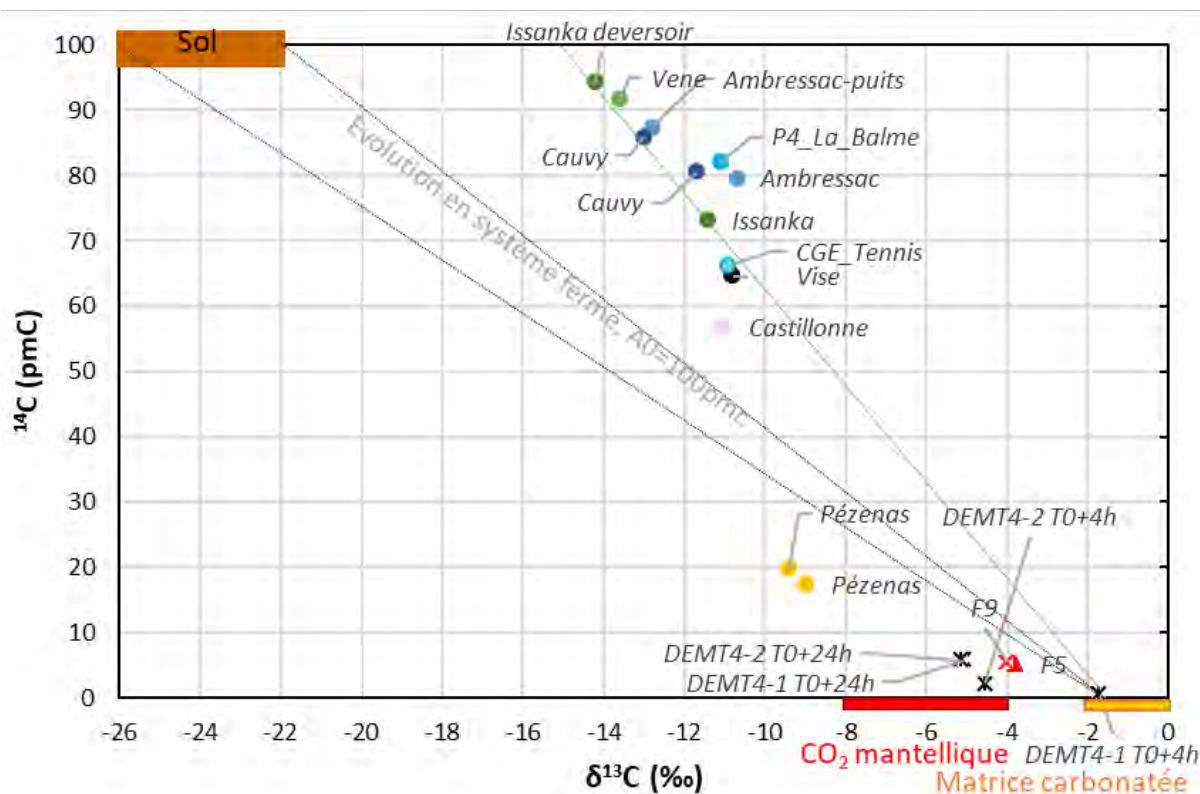


Figure 50: Activités ^{14}C (pcm) en fonction de la signature isotopique en ^{13}C ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$ en ‰) de DEMT4 et des précédents résultats (BRGM/RP-71281-FR). Les signatures isotopiques en C du pôle CO_2 mantellique (Blavoux et al 1982) et de la matrice carbonatée sont représentées en rouge et jaune respectivement.

Chlore 36

Les nouveaux résultats des forages DEMT3 et DEMT4 sont illustrés en Figure 40. Tous les échantillons ont pu être mesurés, le DEMT3-2 (24 h de pompage) étant toutefois en dessous des limites de détections en ^{36}Cl .

La signature du DEMT3-1 (4 h de pompage) est très comparable au forage F8 (août 2018), mettant en évidence des âges ^{36}Cl très ancien ($\approx 60\,000$ ans, Figure 42).

Les eaux de DEMT4 présentent d'importantes variations de signature au cours des pompages et ont des rapports $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ plus importants que ceux des ouvrages thermaux (Figure 42). Deux hypothèses sont envisageables dans l'interprétation des résultats car la position des eaux de l'ouvrage DEMT4-1a prélevées au début du pompage (T+4h) est ambiguë :

- Dans la première hypothèse, la signature ^{36}Cl se place sur la droite d'évolution théorique 3c qui décrit l'évolution de la signature ^{36}Cl dans un réservoir carbonaté initialement composé de 9 % d'eau de mer et de 91 % d'eau de recharge ancienne de « type Pézenas » (contribution de mélanges estimée avec les concentrations en chlorure). Si l'on accepte que les eaux échantillonnées au début du pompage permettent de qualifier les eaux de la matrice carbonatée ayant subi d'importantes interactions eau-roche en présence de CO_2 , les eaux initialement échantillonnées dans le forage seraient anciennes, l'âge ^{36}Cl serait de 50 000 à 60 000 ans (Figure 42).

- Dans la seconde hypothèse, la signature ^{36}Cl se place entre les courbes 2c, 2d, 2e et 2f qui décrivent les mélanges entre l'eau du karst sous couverture Miocène et l'eau marine ou thermique (Figure 42). Dans ce contexte, il n'est pas possible d'évaluer l'âge apparent ^{36}Cl de l'eau. La signature en CFC observée en début de pompage serait donc attribuée à la composante karstique actuelle.

Les évolutions observées au cours des pompages du DMT4 (diminution des rapports $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$, augmentation du ^{36}Cl) suggèrent la mobilisation d'eau d'origine marine dépourvue en $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ et/ou d'eau thermique. Selon la configuration retenue à l'aide des isotopes du strontium, les pompages mobilisent des eaux thermales (16 et 7 % pour le premier et deuxième pompage respectivement) et des eaux marines (7 et 5 % pour le premier et deuxième pompage respectivement).

6. Synthèse et implications des nouveaux résultats

6.1. SYNTHÈSE ET DISCUSSION DES NOUVEAUTES APPORTEES PAR LES FORAGES DEMENT1, DEMENT2, DEMENT3 ET DEMENT4

Les nouveaux forages de la plateforme expérimentale ont permis d'apporter de nouvelles informations concernant le sous-sol de la presqu'île de Balaruc-les-Bains, nécessaires à la meilleure compréhension de la structure et du fonctionnement hydrogéologique et hydrothermal du site. Ces ouvrages ont notamment permis d'acquérir des données géochimiques inédites sur l'origine des fluides en fonction de la profondeur, d'estimer les temps de résidence de l'eau et également de préciser les relations hydrauliques entre le gisement thermal et l'aquifère karstique de surface.

Les nouveaux résultats acquis grâce aux ouvrages DEMENT1 et DEMENT2 confirment les précédentes interprétations tout en permettant d'acquérir des données sur des zones profondes qui étaient jusque-là inaccessibles. Le forage DEMENT2, localisé dans les sédiments du Miocène et notamment dans des horizons coquillés/sableux producteur, a une signature géochimique intermédiaire à celles mesurées dans le karst et les eaux thermales. Les rapports isotopiques en strontium ont permis d'estimer que DEMENT2 est composé d'eau thermique à environ $55 \pm 5 \%$ et d'eau de type karstique ($45 \pm 5 \%$). Au vu de la morphologie du système, il apparaît que les eaux thermales pénètrent dans le Miocène probablement dans le voisinage de l'ouvrage S12 (cf Figure 53), même si, dû à une charge hydraulique supérieure de l'aquifère Jurassique à celle mesurée dans l'aquitard Miocène, l'existence d'une drainance ascendante entre les formations est possible. Les âges Hélium des eaux karstiques de DEMENT2, une fois corrigée de l'apport d'eau thermique, sont importants (âge Hélium compris entre 11 000 et 17 000 ans pour une porosité à 1 %). Ce résultat est confirmé par des teneurs en radon et en coliformes faibles. Ceci est cohérent dans un contexte de circulation d'eau lente dans les sédiments peu perméables du Miocène. Au cours du pompage, l'âge Hélium des eaux diminue, impliquant une mobilisation de plus en plus importante d'eaux plus jeunes probablement issues d'un niveau plus perméable supposé située dans les horizons plus superficiels de la formation. En effet, l'eau de cet ouvrage est aussi caractérisée par une contamination spécifique en gaz anthropique (CFC-12), dont la source de contaminations est locale et récente (<70 ans). Cette contamination semble bloquée dans les sédiments du Miocène puisqu'elle n'a pas été enregistrée dans les autres ouvrages profonds situés dans le karst de la presqu'île.

L'eau prélevée dans le DEMENT1 entre 130 et 180 m de profondeur a des caractéristiques géochimiques proches des eaux de la Vise et de celles du forage F6, l'ouvrage est en connexion hydraulique avec la Vise (interprétation des essais de pompage). Les différents traceurs géochimiques ont permis d'estimer que DEMENT1 est composé essentiellement d'eau karstique (environ 90 %), provenant au moins en partie du massif de la Gardiole (signature en gaz anthropiques et contaminations bactériologiques) et d'eau thermique (environ 10 %). Il semblerait, d'après les isotopes du bore, que les eaux thermales alimentant DEMENT1 n'ont pas encore interagi avec des argiles et/ou de la matière organique, ce phénomène est supposé se produire préférentiellement au toit du Jurassique au contact avec la formation argilo-silteuse du Miocène. La proportion d'eau thermique dans l'ouvrage a augmenté au cours de l'essai de pompage mettant en évidence l'existence d'une fluctuation de la zone de transition entre les eaux thermales et les eaux karstiques (illustration en Figure 53). Les temps de résidence estimés par la méthode hélium donnent des âges compris entre 2 500 et 4 500 ans pour des porosités de 0,5 %, ces résultats s'expliquent principalement par la contribution du pôle thermal. Le pôle karstique qui contribue à l'alimentation de l'ouvrage DEMENT1 est composé d'eau récente subactuelle en raison des traces de contaminations bactériologiques. Ce résultat laisse supposer l'existence de flux d'eau rapide

par le biais de fracture et/ou de cavités karstiques bien connectées avec la zone de recharge du karst de la Gardiole.

Les nouveaux forages DEMENT3 (rebouchés) et DEMENT4 (759 m de profondeur) qui permettent d'explorer et de qualifier les horizons plus profonds de l'aquifère, ont été échantillonnés en période d'inversac, il n'est donc pas possible de connaître les signatures des eaux des horizons plus profonds (supérieurs à 180 m) en période normale. **Au terme de ce projet, la question de la qualité des eaux sous-jacente en contexte de fonctionnement normal reste posée.**

En période d'inversac (44 jours après le déclenchement du phénomène d'inversac, seule période de prélèvement du forage), les eaux prélevées au DEMENT3 (Jurassique supérieur entre 200-280 m de profondeur) présentent une forte minéralisation (de l'ordre de 27,3 mS/cm) en comparaison à celle mesurée dans l'aquifère (entre 130 et 170 m de profondeur, DEMENT1) avant le phénomène d'inversac (autour de 2 mS/cm). Les données géochimiques laissent suggérer que ces eaux sont un mélange entre les eaux thermales et une eau d'origine marine, dont les proportions sont évaluées à 70 % et 30 % respectivement. Les isotopes du strontium permettent de préciser l'origine des eaux mobilisées par le pompage, les signatures apparaissent expliquées par un mélange à trois composantes (56 % d'eau d'origine karstique, 14 % d'eau d'origine thermique et 30 % d'eau marine). La proportion d'eau thermique demeure stable au cours du pompage contrairement à la contribution d'eau marine qui augmente (34 %) au détriment de la part karstique (21 %). Les informations apportées par le chlore 36 suggèrent que la signature de l'eau matricielle principalement mobilisée en début de pompage est très comparable à celle mesurée dans le forage F8 ce qui pourrait indiquer que l'eau de la matrice est ancienne. Dans ce contexte, l'origine de la salinité impliquée dans le mélange du DEMENT3 demande à être questionnée et précisée. En effet, plusieurs hypothèses sont envisageables comme représentées sur le schéma conceptuel (Figure 44). Les interprétations du test hydraulique permettent de quantifier les flux d'eau apportés par la zone perméable sollicitée par le pompage (L10-BRGM RP-70842- FR, Ladouche et al, 2022). En fin de pompage, environ 70 % du flux pompé proviendrait de la zone perméable selon les estimations réalisées. A partir de la salinité de l'eau pompée, calculée à partir des données de suivi de la conductivité, l'eau issue de la zone perméable aurait une salinité voisine de 21 g/l et celle de la matrice de l'aquifère où est implanté l'ouvrage serait de l'ordre 10 g/l, soit une valeur assez proche de celle du pôle thermal F8 (entre 8,8 g/l). L'ouvrage DEMENT1 qui, on le sait est très bien connecté à la Vise, présentait à la même période une teneur en chlorure de 10 g/l et les eaux de la source S12 (également bien connectée à la Vise) des teneurs en Cl de 15,5 g/l. Dans ce contexte, les structures perméables du karst semblent être les vecteurs de l'eau salée absorbée par la Vise. La présence de bactéries et de gaz anthropiques semble aussi confirmer que les eaux marines proviennent bien de la lagune et non d'eau saumâtre présente dans le système. Ces éléments suggèrent que ce serait le modèle 1b de la Figure 44 qui serait le plus à même de décrire les évolutions hydrodynamiques et géochimiques observées au cours du pompage.

Les eaux prélevées dans le Jurassique moyen (DEMENT4 entre 620 et 759 m de profondeur) sont globalement assez froides (25 °C/26 °C) compte tenu de leurs profondeurs et du gradient géothermique. En considérant une température moyenne de recharge de 15 °C, et un gradient géothermique moyen de +3 °C/100 m, des températures de l'ordre de 36 °C auraient pu être attendues pour ces eaux profondes. L'anomalie négative de température témoigne globalement de circulations karstiques actives à ces profondeurs.

L'échantillonnage d'eau réalisé en début de pompage T0+4h au cours du premier test (760-620m) permet de qualifier la signature géochimique de la matrice carbonatée selon les résultats de l'étude hydraulique de l'ouvrage, le second prélèvement (T0+24h) constitue un mélange entre l'eau de la matrice et l'eau en provenance de la zone perméable identifiée à environ 200 m du puits de pompage. Les eaux profondes échantillonnées à T0+4h sont très singulières en comparaison des eaux du Jurassique supérieur (DEMENT1) ou des eaux thermales (F9). Les eaux apparaissent très enrichies en Mg (210 mg/l), Li (185 µg/l) et Sr (16864 µg/l) compte tenu de leurs

concentrations en Cl (1808 mg/l), les rapports isotopiques du strontium sont faibles ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,7075$) en comparaison des autres signatures karstiques de la zone d'étude. La signature carbone 13 des eaux et l'activité ^{14}C des eaux indiquent par ailleurs que les eaux du réservoir en profondeur ont subies d'importantes interactions eau-roche en présence de CO_2 dissous d'origine profonde (probablement issue du socle sous-jacent).

Le rapport B/Cl des eaux du forage DEMENT4 suggère l'existence de phénomène d'absorption du bore vraisemblablement sur les horizons marneux identifiés sur la carotte, ce processus n'a pas été mis en évidence sur le DEMENT3. Dans ce contexte, les rapports isotopiques du bore devraient se situer au-dessus de la droite de mélange théorique entre l'eau du karst et l'eau marine, or, les signatures se positionnent sous la droite de mélange théorique. Ces résultats peuvent s'expliquer si l'on considère la participation d'eau du socle qui selon la littérature est très appauvrie en isotopes lourds (^{11}B). Trop d'inconnues demeurent sur les eaux du socle sous-jacent ($\delta^{11}\text{B}$, teneurs en B) pour envisager une quantification.

Les eaux du pôle karstique profond DEMENT4 défini à l'aide de l'échantillon DEMENT4-1_T0+4h (attribué à la matrice carbonatée) présentent des teneurs en Cl significativement supérieures aux eaux karstiques échantillonnées dans le Jurassique supérieur (respectivement 1808 mg/l et de l'ordre de 20 à 25 mg/l pour les eaux karstiques). L'origine de ces teneurs élevées demanderait à être mieux précisée dans le futur, les informations apportées par le chlore 36 suggèrent une origine marine et/ou thermale. La contribution du pôle marin est évaluée à $9\% \pm 2\%$ à l'aide des concentrations en chlorure. Si l'on considère ces proportions de mélange et les résultats du modèle d'évolution théorique du rapport $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ au sein d'un réservoir carbonaté, l'âge apparent chlore 36 des eaux de la matrice serait compris entre 15 000 et 55 000 ans selon les hypothèses considérées en entrée pour le pôle karstique.

Les évolutions de minéralisation observées au cours des tests hydrauliques sur DEMENT4 témoignent de l'existence de mélange comme démontré en exemple, par la signature isotopique du strontium (Figure 46). Du point de vue hydraulique, l'ouvrage sollicite assez rapidement (500 mn ou 100 mn selon la profondeur sollicitée) une structure perméable caractérisée par des eaux nettement plus minéralisées que celles mobilisées dans la matrice du réservoir en début de pompage. Là encore, l'origine des eaux plus minéralisées sollicitées par le pompage demanderait à être mieux précisée. Les informations apportées par le chlore 36 suggèrent une origine thermale de type « Forage F9 » ou « Forage F8 », toutefois, on ne peut pas exclure la participation d'une eau marine de type « pôle marin actuel » d'après les informations isotopiques du strontium. Ces résultats questionnent maintenant sur la nature des eaux thermales mobilisées, s'agit-il des eaux du réservoir profond ou d'eau thermale que l'on rencontre au toit du Jurassique supérieur au niveau de la presqu'île de Balaruc-les-Bains de type F9/F5 ou F8. Les très faibles valeurs des gaz dissous (SF_6 et CFC) mesurés dans l'ouvrage DEMENT4 suggèrent que les fluides thermaux mobilisés par le pompage proviennent des eaux thermales sus-jacentes (type F5/F9) elles même influencées par mélange par des eaux karstiques chargées en CFC et SF_6 . Ces résultats suggèrent donc que les communications entre le Jurassique supérieur et le Jurassique moyen sont possibles et « activables » en situation de pompage. En considérant le pôle F9 comme pôle thermal, la contribution du pôle thermal en fin de pompage est évaluée à $8 \pm 6\%$ contre $92 \pm 2\%$ pour l'eau du pôle profond DEMENT4. Lors du second test de pompage (horizons testés entre 390 et 760 m de profondeur), la contribution du pôle thermal en fin de pompage est évaluée à $15 \pm 6\%$ contre $81 \pm 3\%$ pour l'eau du pôle profond DEMENT4 et $4 \pm 3\%$ d'eau d'origine marine de type lagune. L'âge apparent déterminé par le chlore 36 des eaux évolue au cours du pompage en raison des phénomènes de mélange identifiés. Lors du second test de pompage (DEMENT4 entre 390 et 760 m de profondeur), l'âge apparent chlore 36 des eaux a tendance à augmenter en raison de la participation d'eau ancienne d'origine thermale.

6.2. REVISION DU SCHEMA CONCEPTUEL DU SECTEUR D'ETUDE EN SITUATION « NORMALE »

Les nouveaux résultats des campagnes mensuelles ont permis de valider les précédentes interprétations des résultats géochimiques et ainsi d'affiner les connaissances sur le schéma conceptuel du système karstique du bassin de Thau. Il est proposé dans cette partie d'exposer notre compréhension du système en reprenant la synthèse présentée dans le L5a et les nouveaux résultats du L5b, illustrée en Figure 53.

Trois types d'eaux principaux sont présents sur la zone étudiée : des eaux marines provenant de la mer méditerranée et en période d'inversac de la lagune, des eaux karstiques et des eaux thermales. Dans le détail, les eaux thermales et les eaux karstiques résultent de phénomène de mélange et d'interaction eau-roche au sein des calcaires Jurassique, la description de différents pôles de mélange et flux d'eaux associés sont rappelés dans la suite.

Les signatures chimiques des eaux karstiques s'expliquent principalement par une eau de pluie qui a évolué et interagi avec une roche carbonatée. L'étude géochimique a montré que ces eaux ont deux zones principales de recharge : le causse d'Aumelas représenté par le trop-plein de la Vène (en crue) et la source permanente d'Issanka et le massif de la Gardiole (représenté par les sources d'Ambressac et de Cauvy dans le secteur d'étude). A l'aval d'Issanka, les informations géochimiques montrent que ces deux flux se mélangent préférentiellement en période de hautes eaux comme en témoignent les informations obtenues sur le forage P4-Balme et dans une moindre mesure CGE-Tennis. Ces eaux passent sous couverture en amont de la presqu'île de Balaruc-les-Bains, et ont des temps de résidence de l'ordre d'une trentaine d'années. Les eaux provenant de la Gardiole ont des temps de résidence plus court, mais les outils utilisés n'ont pas permis de donner un âge moyen dû à des contaminations locales de gaz anthropiques. Ces contaminations ont été enregistrées en parallèle dans différents ouvrages de la presqu'île (Ambressac, Cauvy, F6, F5, S12) témoignant du mélange des eaux karstiques provenant de la Gardiole dans ces ouvrages. Ceci a été confirmé par les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ plus élevées spécifiques des eaux provenant de la Gardiole enregistré à Ambressac, mais aussi dans les ouvrages Cauvy, F6, la Vise et DEMENT1. Cela a aussi été enregistré au niveau bactériologie puisque les fortes contaminations enregistrées à Ambressac affectent aussi S12, F6, Cauvy et DEMENT1. Enfin, l'étude des communautés bactériennes a également permis de tracer ce flux local. Il ressort que les ouvrages F4 et F6 ont des communautés bactériennes qui peuvent être associées aux eaux de Cauvy alors que les eaux de l'ouvrage S12 sont plutôt associées aux eaux d'Ambressac (Figure 28 et 29, BRGM/RP-71281-FR Ranchoux et al., 2022).

Au sein de la presqu'île de Balaruc-les-Bains, les ouvrages F4, F6 et S12 et à certaines périodes l'ouvrage F5 permettent d'illustrer l'existence du phénomène de mélange entre les eaux thermales et les eaux karstiques. Les ouvrages F4, F6, DEMENT1, Cauvy, Ambressac ainsi que l'exutoire de la Vise sont très majoritairement composés d'eau d'origine karstique (de 90-99 % d'eau karstique) et d'une contribution variable d'eau thermale au cours du cycle hydrologique (1 à 10 % d'eau d'origine thermale). Les analyses géochimiques ont mis en évidence que les eaux drainées par les sources d'Ambressac et de Cauvy sont des mélanges à faible proportion d'eau thermale, en particulier en période de hautes eaux (HE). Il est proposé pour expliquer ces résultats que les mises en charge du karst en HE mobilisent par effet piston de manière plus importante les lignes de courants profondes du réservoir karstique et mobilisent les eaux thermales sous-jacentes (illustré par les flèches bleues pour Ambressac et Cauvy, Figure 53). Il a été montré dans ce présent livrable que les variations temporelles chimiques de ces ouvrages proviennent essentiellement de la variation des proportions d'eaux thermales. Ces nouvelles informations apportées par le projet permettent de renforcer le schéma conceptuel de fonctionnement précédemment établi (Aquilina et al, 2003) : la presqu'île de Balaruc-les-Bains constitue le lieu de convergence d'un flux karstique dit régional en provenance de l'impluvium

amont (Causse d'Aumelas/montagne de la Moure), de flux karstiques locaux provenant de la partie sud-est de la Gardiole et d'un flux thermal, et dont le principal exutoire est la source de la Vise.

Les eaux thermales proviennent d'un réservoir thermal, supposé situé en profondeur, et localisé dans une matrice carbonatée d'âge jurassique. Ces eaux chaudes et anciennes (cf rapport BRGM/RP-71281-FR pour plus de détails) remontent rapidement, de l'ordre d'une dizaine de jours d'après les informations apportées par les isotopes du radium (Condomines et al., 2012), vers le toit du Jurassique très vraisemblablement en empruntant des fractures le long du chevauchement de Thau mis en évidence durant le projet DEM'Eaux entre la presqu'île de Balaruc-les-Bains et Sète, illustré sur la carte en Figure 53. Ces eaux minérales chaudes par contraste de densité se localisent préférentiellement au toit du réservoir carbonaté et se trouvent plus ou moins bloquées par les couches supérieures imperméables du Miocène, la charge hydraulique au sein du karst est supérieure à celle des aquitards du Miocène. Les isotopes du bore et du radon confirment que ces eaux échangent avec la formation argilo-silteuse du Miocène au toit du Jurassique et/ou dans la zone karstifiée au toit du Jurassique (et non dans la partie plus profonde). L'utilisation des gaz anthropiques, en complément des éléments présentés dans le paragraphe précédent, a montré que les ouvrages F5 et S12 sont composés de 8 à 20 % selon les campagnes d'échantillonnage d'eau récente (inférieure à 70 ans) d'origine karstique par phénomène de mélange au sein du réservoir du Jurassique supérieur dans lequel converge les écoulements de surface et profond de Balaruc-les-Bains. Les proportions de mélange avec les eaux karstiques récentes les plus faibles sont enregistrées en période de basses eaux (juin, juillet et septembre). Cette fluctuation, illustrée en Figure 53, est globalement inversement corrélée à la quantité d'eau thermique dans F6 mettant en évidence que la zone de transition entre les eaux thermales et les eaux douces fluctue en fonction des conditions hydrologiques.

Les nombreux calculs de mélanges effectués dans ce travail (isotopes stables de l'eau, concentration en Na, Cl, isotopie du Sr...) confirment les proportions de mélange proposées dans les études précédentes (ex : Aquilina et al., 2002 ; Pétré et al, 2020) pour les eaux thermales (70 % d'eaux d'origine karstique, 30 % d'eau d'origine marine). L'excès en Ca, Sr et HCO_3 dans ces eaux par rapport à la droite de mélange avec les eaux de mer traduit l'existence d'interactions eau-roche avec les roches carbonatées. Les isotopes du strontium confirment que ces eaux interagissent et circulent dans une matrice carbonatée d'âge Jurassique. Les conductivités et salinités plus élevées notées en S12 (et F8 et Sète/stade Michel dans le rapport BRGM/RP-71281-FR), mettant en évidence un mélange avec des proportions d'eau de mer plus importantes, ont permis de mettre en évidence un nouveau flux marin récent. Au vu des formations géologiques, il a été proposé que ce flux soit dû à une intrusion d'eau salée de type mer/lagune actuelle possiblement par le pointement du Jurassique qui se trouve dans la lagune de Thau (entre Sète et Balaruc-les-Bains) et/ou directement par un contact de l'eau de mer avec les roches du Jurassique depuis le mont St Clair. Ce nouveau flux d'eau a été illustré en Figure 53 (en violet).

L'étude du lithium permet d'actualiser le schéma conceptuel de structure et de fonctionnement de cet hydrosystème complexe. Les teneurs en lithium des eaux thermales sont importantes et ne peuvent pas s'expliquer comme le résultat d'un simple mélange entre des eaux marines et des eaux karstiques. Ces excès ne sont pas non plus liés à des interactions eau-roche avec les carbonates du Jurassique puisque les calcaires contiennent très peu de lithium. Afin d'expliquer ces résultats, un apport externe doit être pris en compte, que nous proposons provenir du socle granitique sous-jacent. En effet les calculs théoriques suggèrent que la signature isotopique en lithium des eaux ($\delta^7\text{Li}$) qui contribuent à définir les eaux thermales est très appauvrie en ^7Li , les valeurs pouvant s'apparenter à des eaux de socle. Ainsi, le socle granitique sous-jacent qui alimente le réservoir thermal par des flux de CO_2 , mis en évidence notamment par la signature isotopique du carbone ($\delta^{13}\text{C}$ du CMTD et l'activité ^{14}C des eaux), pourrait également alimenter le

réservoir thermal profond par des flux de solutés chargés en lithium. Les informations du forage profond DEMENT4 permettent de montrer sans ambiguïté l'existence d'un flux de socle dans le réservoir profond du Jurassique moyen. Toutefois, l'enrichissement en lithium par rapport à la droite de dilution des eaux de mer apparaît bien plus important que celui précédemment mis en évidence pour les eaux thermales (Figure 47). Se pose ainsi la question de l'origine de l'apport plus important en lithium de DEMENT4 par rapport aux eaux thermales : s'agit-il d'un apport plus important d'eau de socle ou existe-t-il un autre apport en lithium dû notamment à des interactions eau-roche spécifiques dans le Jurassique moyen et ou inférieur ? Il n'est pas possible à ce stade de répondre avec certitude, même si l'existence de phénomène d'absorption mis en évidence avec le bore pourrait être lié à des interactions eau-roche avec les horizons marneux du Jurassique moyen et/ou des marnes du lias sous-jacent.

L'estimation plus précise de l'âge des eaux thermales par différentes approches géochimiques constitue un apport important de ce travail. C'est le couplage des informations apportées par les différents outils qui a permis de contraindre les paramètres d'entrées des modèles géochimiques et de réduire les incertitudes sur l'estimation des âges des eaux thermales. Les isotopes du carbone permettent de démontrer l'existence d'un flux de CO₂ d'origine profonde attribué au socle sous-jacent. Les données des isotopes de l'eau et les concentrations en Cl, Na et Li des eaux ont permis une estimation de la contribution relative de ce flux externe issu du socle (de 60 % à 70 % pour le lithium), et donc d'évaluer la correction à apporter à la méthode hélium pour l'estimation de l'âge de l'eau. Pour la méthode de datation à l'hélium, les données géophysiques acquises sur les ouvrages de la plateforme expérimentale (DEMENT1, DEMENT2,) et notamment les données de gamma-ray spectrale permettent une estimation des teneurs en uranium et thorium des carbonates et donc une estimation de la fonction de production interne d'hélium au sein du réservoir. Les données de datation carbone 14 et la signature carbone 13 ($\delta^{13}\text{C}$) ainsi que les caractéristiques chimiques des eaux profondes de Pézenas ont permis ensuite de contraindre l'estimation de l'ordre de grandeur de la porosité efficace du réservoir Jurassique en profondeur. C'est la combinaison de l'ensemble de ces informations qui ont permis de valoriser les données acquises sur les forages thermaux. Pour la méthode de datation avec le chlore 36, c'est de nouveau le couplage des informations apportées par les isotopes de l'eau, et les concentrations en Cl des eaux ainsi que les informations des eaux profondes de Pézenas qui permettent de paramétrer les modèles d'évolution géochimique et de réduire les incertitudes. Ensemble, les différents outils ont permis d'affiner les estimations précédentes (Aquilina et al., 2002) sur l'âge de l'eau des forages thermaux, de l'ordre de 50 000 ans ($\pm 15\,000$) pour F9 et de 80 000 ans ($\pm 20\,000$) pour F8. Les autres eaux thermales de la presqu'île de Balaruc-les-Bains (F5, F14, S12) présentent des âges apparents globalement plus faibles en raison de l'existence de phénomènes de mélange avec des eaux d'infiltration plus récentes comme le témoignent les informations apportées par les gaz anthropiques.

Les informations nouvelles apportées par l'ouvrage profond DEMENT4 et notamment les données des isotopes du strontium et du carbone permettent de questionner le schéma conceptuel existant. En effet, les eaux karstiques profondes de DEMENT4 n'ont pas les mêmes signatures en strontium que les eaux karstiques analysées jusqu'à présent. Il est établi à l'aide des isotopes stables de l'eau que les eaux thermales sont composées d'un mélange d'eau karstique (70 %) et d'eau marine (30 %), qu'elles interagissent longuement (plusieurs dizaines de milliers d'années) au sein d'un réservoir carbonaté profond (informations de la température, du strontium, du chlore 36 et de l'hélium) avant de remonter rapidement vers le réservoir du Jurassique supérieur (isotopes du radium) très vraisemblablement par la faille de Thau identifiée dans le cadre du projet entre Balaruc-les-Bains et Sète. Si on accepte l'idée que les eaux profondes du type « DEMENT4 » contribuent au fonctionnement hydrogéologique de la zone d'étude, deux hypothèses sont possibles pour expliquer les valeurs en strontium des eaux thermales :

1. Les eaux thermales ne sont composées que d'eaux karstiques de types DGMT4 et d'eaux marines. En considérant un pôle marin de même caractéristique que le pôle marin actuel, le pôle DGMT4 doit être appauvri en strontium par rapport à la valeur mesurée (courbe grise dans la Figure 51). Des concentrations en strontium plus basses en DGMT4 sont possibles puisque nous avons proposé précédemment que l'excès en Sr] serai dû à une dissolution plus intense des roches carbonatées liée à un apport de CO₂ du socle. Dans ce cas de mélange binaire entre les eaux marines actuelles et les eaux de DGMT4 appauvries en Sr par rapport aux valeurs mesurées (concentration de 2500 µg/L au lieu de 16 864 µg/L, c'est-à-dire 15 % du strontium total), les eaux thermales seraient composées de 20 à 30 % d'eau marine et 70 à 80 % d'eau karstique de type DGMT4 (Tableau 24). Ceci est cohérent avec les précédents résultats.
2. Les eaux thermales sont composées d'eau karstique profonde, d'eau karstique de surface et d'eau marine. En considérant le DGMT4 comme nouveau pôle représentant les eaux profondes, CGE-Tennis comme pôle karstique de surface récent et la lagune comme pôle marin, les proportions de mélange des eaux thermales peuvent être reconsidérées (Tableau 24). Ces nouvelles proportions confirment les résultats précédents présentant 70 % d'eau karstique et 30 % d'eau marine. Toutefois ces nouveaux résultats requestionnent le schéma conceptuel considéré jusqu'à présent : seul 10 % des eaux thermales proviendrait d'un flux profond de type DGMT4. Les 60 % d'eau karstique restante ne sont toutefois pas nécessairement récente puisque le forage de Pézenas par exemple, dont les eaux proviennent de 740 m de profondeur, a des signatures isotopiques en strontiums proches des eaux de CGE tennis prouvant que cette signature est enregistrée dans les eaux sur de grandeurs profondeurs.

Tableau 24 : Proportion d'eau à trois pôles des eaux thermales.

Nom	Proportion d'eau à trois pôles (%)			Nb points	Période
	Pôle karstique peu profond CGE Tennis 2019	Pôle karstique profond DGMT4-1 (4 h)	Pôle marin Lagune de Thau 2021		
F5	58	11	31	11	2018-2020
F9	58	10	32	4	2018-2019
F14	58	11	32	4	2018-2019
S12 Ecole	58	10	31	11	2018-2020
F8	50	8	42	4	2018-2019

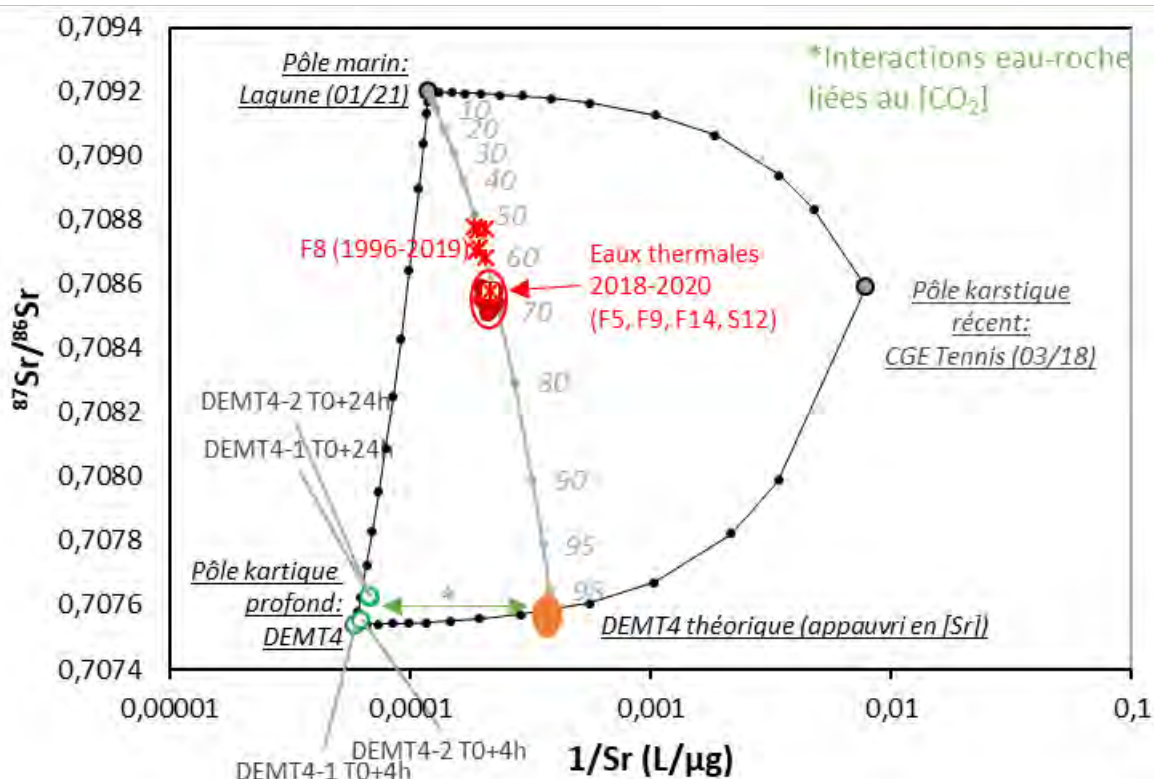


Figure 51: Rapport isotopique $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en fonction de l'inverse de la concentration en Sr des eaux thermales F5, F9, F14 et S12. Les signatures en Sr de ces eaux peuvent être expliquées par un mélange à deux pôles marin-DEM4 théorique (courbe grise) ou par un mélange à trois pôles Marins-DEM4-karstique récent (courbes noires). Les proportions de mélange sont données dans le texte et en Tableau 24)

A ce stade, il n'est pas possible de trancher sur ces deux hypothèses. En complément, la localisation des mélanges avec les eaux de mer n'est pas connue. Quatre scénarios concernant l'origine des températures des eaux thermales sont donc envisageables, illustrés en Figure 52, en supposant aucune déperdition de température le long de la faille de Thau au cours du transfert des eaux vers la surface:

- Scénario 1a, Figure 52 : les eaux thermales sont des mélanges à 60 % d'eau karstique du Jurassique supérieur et 10 % d'eau du Jurassique inférieur, et les mélanges avec les eaux marines se font dans le réservoir du Jurassique supérieur en surface (toit du Jurassique). Dans ce scénario, ce sont donc les 10 % de contribution du Jurassique moyen qui apporterait la température des eaux thermales du type Forage F9 (50° C au forage F9). Dans ce cas, ces eaux doivent être proches de 250 °C. En considérant le gradient géothermique local (3°C/100m) et une température moyenne des eaux du Jurassique sup. de 26 °C, le réservoir thermal Jurassique doit se situer à environ 8000 m de profondeur (voir plus profond si les températures sont plus froides, voir Figure 52). **Ce scénario n'est pas envisageable sur le site, les calcaires Jurassiques n'atteignant jamais ces profondeurs.**
- Scénario 1b, Figure 52 : les eaux thermales sont des mélanges à 60 % d'eau karstique du Jurassique supérieur et 10 % d'eau du Jurassique moyen, et les mélanges avec les

eaux marines se font en profondeur, au niveau d'un réservoir thermal profond. Dans ce scénario, en considérant les températures mesurées dans le réservoir Jurassique (entre 15 et 26 °C) et le gradient géothermique, le réservoir thermal profond du Jurassique devrait se situer entre 2400 et 2900 m de profondeur (température de l'eau comprise entre 90 et 100 °C). **Dans ce contexte, on pourrait imaginer qu'il existe un réservoir thermal dans la partie sud-est de la zone d'étude dans le réservoir carbonaté profond sous couverture Oligocène et que ce réservoir soit saumâtre. Les fluides thermaux circuleraient le long de la faille de Nîmes puis seraient capturés par la faille de Thau et convergeraient ensuite vers la presqu'île de Balaruc-les-Bains pour se mélanger avec les eaux d'origine karstique du Jurassique supérieur et moyen en profondeur puis remonterait vers la presqu'île de Balaruc-les-Bains.**

- Scénario 2a, Figure 52 : les eaux thermales sont composées essentiellement d'eau du Jurassique moyen et les mélanges avec les eaux marines se font en surface : les 70 % d'eaux profondes du Jurassique moyen doivent être au minimum à 65 °C et donc le réservoir thermal autour de 1700 m de profondeur.
- Scénario 2b, Figure 52 : Les eaux thermales sont composées essentiellement d'eau du Jurassique moyen et les mélanges avec les eaux marines se font en profondeur : la température des eaux thermales est supposée apporter à 100 % par les eaux de ce réservoir. Dans ce contexte, compte tenu du gradient géothermique, le réservoir thermal serait situé à environ 1200 m de profondeur. Pour les deux derniers scénarios (2a et 2b), **on pourrait imaginer qu'il existe un réservoir thermal dans la partie sud-ouest de la zone d'étude dans le réservoir carbonaté profond et que ce réservoir serait drainé par la faille de Thau. Les eaux convergeraient ensuite vers la presqu'île de Balaruc-les-Bains et/ou Sète tout en interagissant avec les fluides issus du socle mobilisés par la faille de Thau puis in fine, remonterait rapidement vers la presqu'île de Balaruc-les-Bains.**

Ces nouvelles hypothèses, quoi que fondamentalement proches des travaux précédents, modifient légèrement le schéma d'interprétations que nous avons du réservoir thermal. En effet, les études précédentes sont parties de l'hypothèse que l'essentiel des eaux douces karstiques circulent dans le Jurassique supérieur. **Il a été montré dans ce présent travail qu'il est aussi nécessaire de prendre en compte les eaux circulant dans le Jurassique moyen (entre 10 et 70 %). Cet élément modifie de manière significative la proportion d'eau qui porte la température et impacte donc la température et profondeur du réservoir thermal (température et profondeur plus faible). Cet élément est aussi impactant sur la localisation du réservoir puisque ce dernier n'est plus localisé dans le Jurassique superficiel, mais dans le Jurassique moyen. De nouvelles zones de localisation du réservoir thermal ont donc été proposées.**

De plus, les températures des eaux dans le réservoir thermal ont été estimées précédemment sur la base des géothermomètres à silice (température 40-86 °C) et sodium-potassium (température de 95-110 °C), permettant d'obtenir des profondeurs supérieures à 1800 m ou comprise entre 2000 et 2500 m (Aquilina et al., 2002). **Le projet DEM'Eaux Thau a montré l'importance de prendre en compte un flux provenant du socle, apportant un flux gazeux (ex CO₂, He) et d'eau (Li) suggérant ainsi aussi un apport de Si. Le géothermomètre à Si n'est donc pas applicable sur la zone d'étude. Les températures et profondeurs obtenues avec le géothermomètre sodium-potassium sont comparables à celles proposées dans ce projet.**

Enfin, la localisation des remontées des fluides thermaux a été proposée au niveau du chevauchement qui délimite les calcaires de la montagne de la Gardiole et ceux du causse d'Aumelas (Aquilina et al., 1997) ou par la faille de Nîmes (Aquilina et al., 2002). **Nous proposons ici de faire aussi intervenir la faille de Thau, faille mise en évidence dans le projet.**

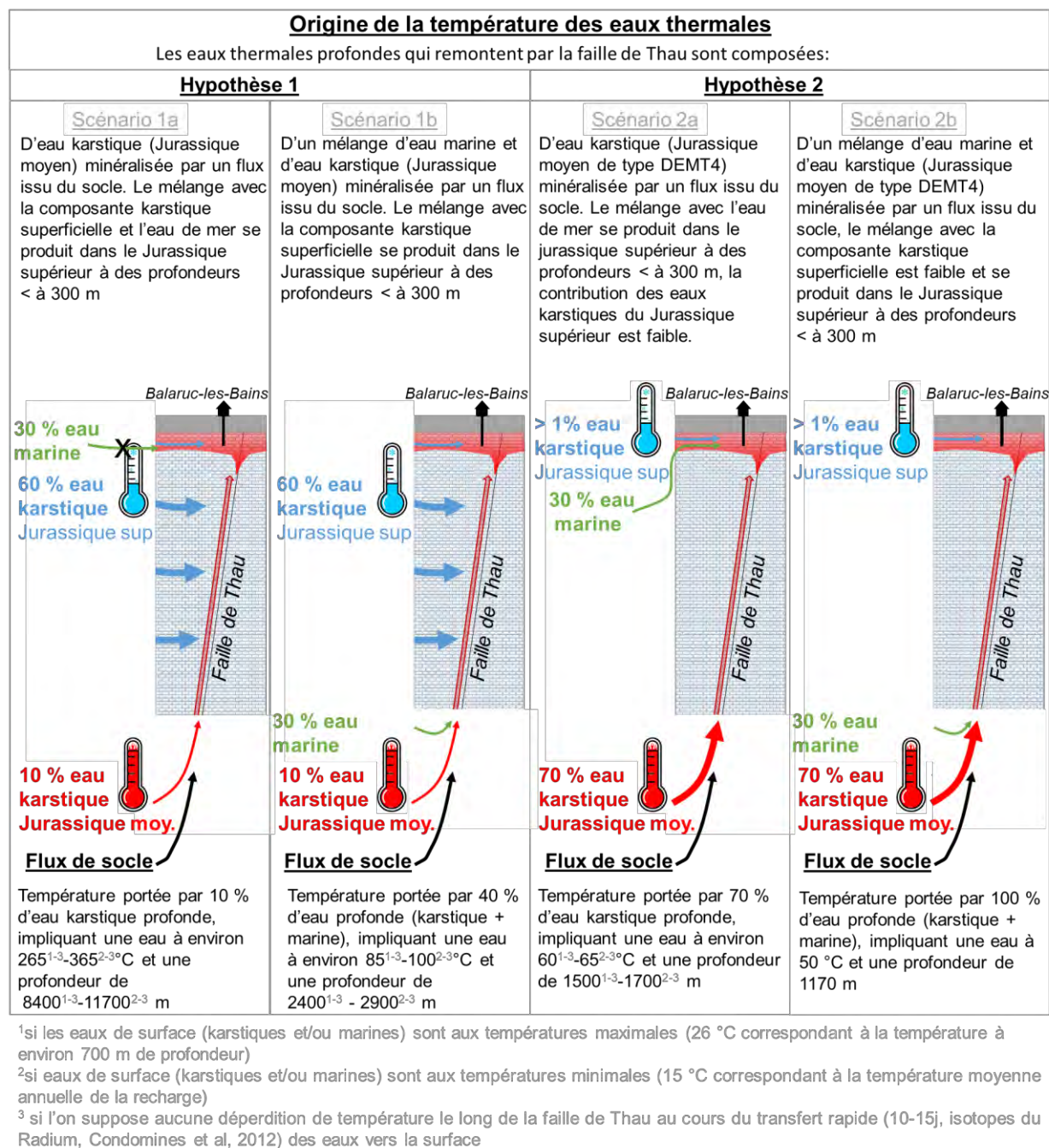


Figure 52: Représentation graphique des différentes hypothèses et scénarios permettant de justifier la température des eaux thermales et d'estimer la profondeur du réservoir thermal.

Au terme de ce projet de recherche, des inconnues demeurent dans le schéma conceptuel de structure et de fonctionnement concernant le réservoir thermal profond, les différentes hypothèses précédentes ne pouvant pas être définitivement retenues ou écartées. Toutefois, ces hypothèses ne remettent pas en question les portions de mélange expliquant les eaux thermales, caractérisées par 30 % d'eau marine et 70 % d'eau karstique.

Situation « normale »

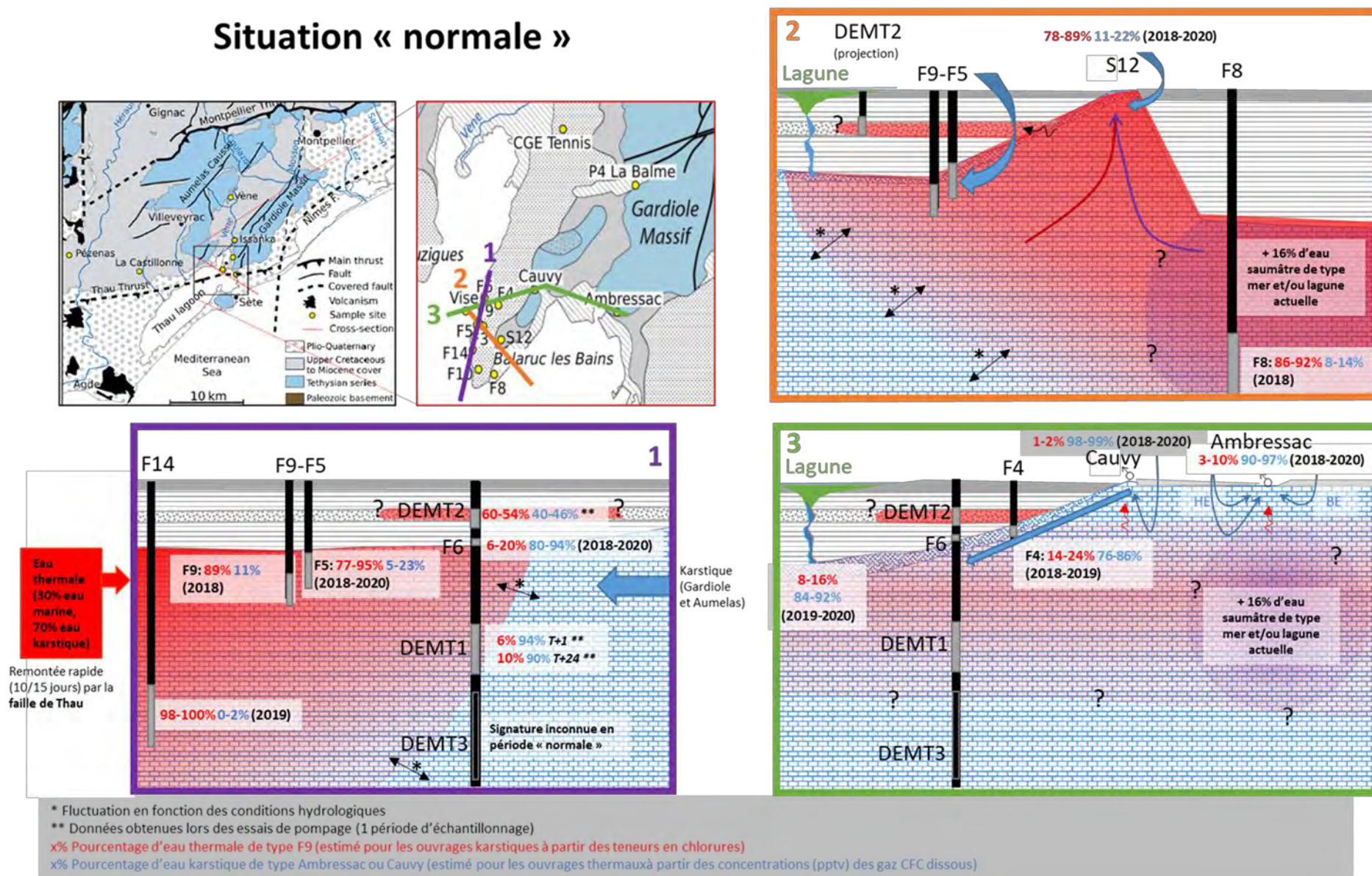


Figure 53: Schéma conceptuel de la presqu'île de Balaruc-les-bains en période « normale ».

6.3. REVISION DU SCHEMA CONCEPTUEL DU SECTEUR D'ETUDE EN CONTEXTE D'INVERSAC

En contexte d'inversac, les ouvrages karstiques DEMENT1, F6, F4, et Cauvy ainsi que les forages thermaux (F9 et F5) ainsi que S12 ont des valeurs de conductivités bien supérieures à la normale et dont les teneurs augmentent pour certains rapidement au cours du phénomène. Les différents traceurs géochimiques semblent valider l'influence des eaux d'infiltration de la lagune sur ces ouvrages et non des eaux saumâtres initialement présentes au sein de l'aquifère. Sur la période suivie, les proportions d'eaux de la lagune peuvent atteindre 40 % en S12, F4 et F6, 14 % à Cauvy, 11 % en F5 et 1 % à Ambressac. En réalité, les outils géochimiques montrent que les signatures des eaux des ouvrages Cauvy, F4, F5, F6, DEMENT1 en période d'inversac tendent vers des eaux de types S12 (résultat d'un mélange), et non directement des eaux de la lagune. Au cours du phénomène d'inversac, la signature des eaux de l'ouvrage S12 semblent atteindre une signature « seuil maximal » composé de 60 % d'eau de la lagune, 33 % d'eaux thermales et 8 % environ d'eau karstique.

Dans le détail, le phénomène d'inversac n'impacte pas les ouvrages de façon homogène et linéaire : une première étape de réorganisation des flux est notée au niveau de la presqu'île. Cette première étape est particulièrement visible en S12, puisque dans les premiers jours, les eaux échantillonnées dans l'ouvrage sont plus fortement influencées par des mélanges avec des eaux karstiques récentes (46 %), vraisemblablement l'eau douce ne pouvant plus sortir par l'exutoire de la Vise. Les évolutions non linéaires observées en F6, F4 et Cauvy mettent aussi en évidence le phénomène de réorganisation des flux. Pour ces ouvrages, une première étape caractérisée par une augmentation en radon a été interprétée comme un apport plus important d'eau provenant de l'interface Jurassique-Miocène dans ces ouvrages en début d'inversac, avant de tendre vers des signatures des eaux de type lagune.

Dans un deuxième temps (quelques jours après le début de l'inversac), les ouvrages de la presqu'île ont des proportions d'eau de la lagune qui augmentent jusqu'à atteindre un nouvel équilibre. Cet équilibre ainsi établi est toutefois fragile, et peut être soumis à des modifications des directions des flux notamment suite à un épisode de recharge comme mis en évidence en juin 2021. La recharge du karst modifie la contribution relative des proportions de mélange au sein de la presqu'île, par exemple, en augmentant la contribution relative des eaux thermales au niveau S12 (de 30 % à 70 %) au dépens de la part d'eau marine de la lagune, ou pour le forage F5, en faisant évoluer les signatures vers des eaux de mélange de type F4/F6, influencées à cette même période par un mélange plus important avec des flux rapides de surface (contaminations fécales) au dépens des eaux thermales. Cet événement de recharge en juin 2021, a modifié les directions des flux principaux comme illustrés en Figure 30, principalement orienté Nord/Sud.

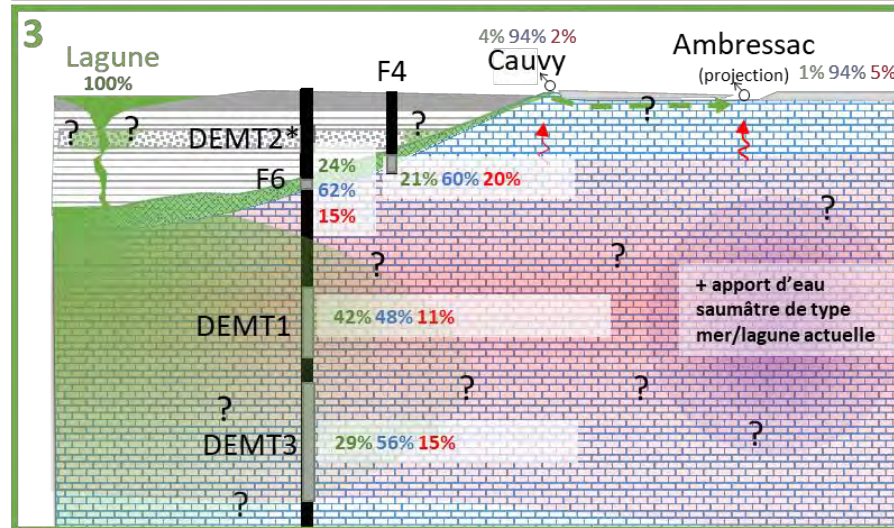
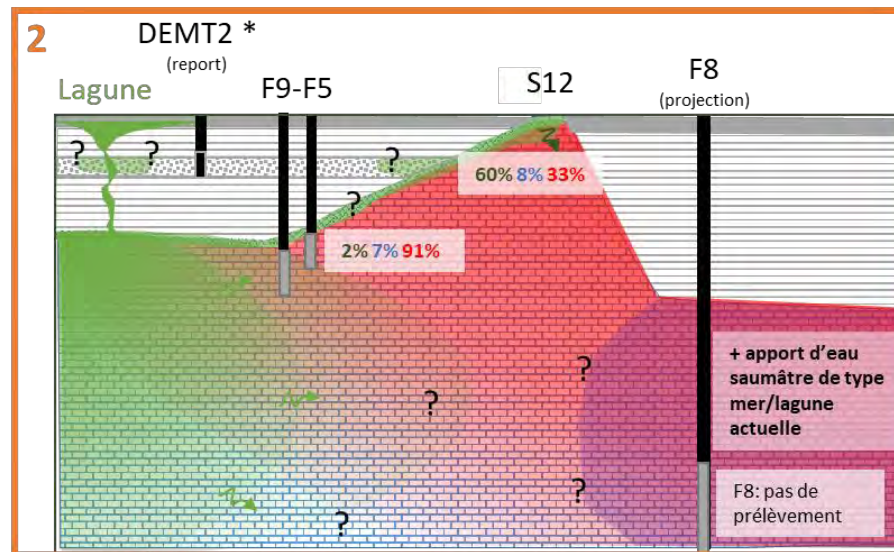
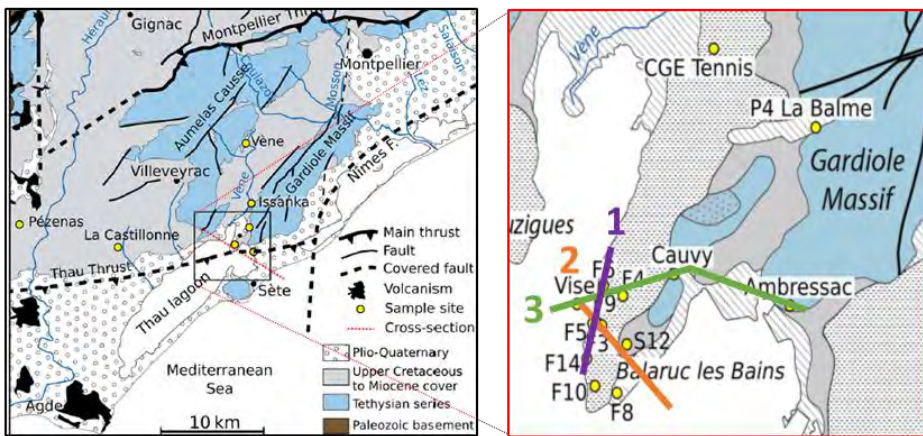
Comme pour DEMENT1 (130-180 m de profondeur), DEMENT3 (200-280 m de profondeur) semble influencé par les eaux de la lagune (cf partie 6.1 pour plus de détails). Afin d'illustrer comment évoluent les flux dans le système, les proportions d'eau de la lagune en janvier 2021 (seule période où les forages DEMENT1 et DEMENT3 ont été prélevés de manière concomitante) ont été illustrés en Figure 54. Les tendances observées questionnent sur l'évolution de la salinité des points : en effet, S12 situé à une distance plus importante de la Vise que les ouvrages F5, F9, F4 et F6 est beaucoup plus impacté par un mélange avec les eaux de la lagune (Figure 35). Ceci ne peut s'expliquer ici que par un apport d'un flux particulier en S12 par rapport aux autres ouvrages. Au vu de la géologie du site et des résultats en radon, nous proposons que la zone karstifiée au toit du Jurassique soit le vecteur principal de cet apport d'eau de la lagune (Figure 54). Un schéma conceptuel comparable est proposé pour expliquer les évolutions de la source de Cauvy ainsi que les signatures mesurées aux forages F4 et F6 dont les zones crépinées permettent d'échantillonner les horizons karstiques peu profonds sous couverture du Miocène. L'ouvrage F5 est beaucoup moins impacté par un apport d'eau de la lagune que F4 et F6 (Figure 29) bien que

situé à des distances similaires de la Vise car moins influencée par les circulations karstiques moins profondes qui se produisent à l'interface Miocène-Jurassique en raison de la profondeur de la zone crépinée de l'ouvrage.

Les nouvelles connaissances du site acquises via le DEMENT2 permettent également de proposer de nouvelles hypothèses d'écoulement. En effet, l'ouvrage DEMENT2 permet d'échantillonner des niveaux producteurs au sein du Miocène (horizons sableux-coquillés) qui apparaissent par ailleurs en partie alimentés par des eaux d'origine thermique (vraisemblablement dans le secteur dans le voisinage de la source thermique historique, à proximité de S12). Il est reconnu que la source sous-marine de la Vise émerge au niveau du banc de calcaire coquillier du Miocène. Dans ce contexte, on ne peut pas complètement exclure qu'en période d'inversac, une part d'eau de la lagune soit apportée au niveau de S12 par les horizons perméables du Miocène connectés à la Vise (Figure 54). Ceci pourrait expliquer que les eaux de S12 soient plus impactées par des mélanges avec les eaux de la lagune que les eaux alimentées essentiellement par le réservoir Jurassique (F4 et F6), tel qu'illustré en janvier 2021 (Figure 29).

Condition d'inversac en Janvier 2021

40 à 45 jours après le début de l'inversac



X% proportion d'eau de la lagune, X% proportion d'eau karstique et X% proportion d'eau thermale estimées avec les isotopes du strontium pour la campagne de janvier 2021

* Pas d'accès au forage DGMT2 en période d'inversac

Eau
thermale
(30% eau
marine,
70% eau
karstique)

Remontée rapide
(10/15 jours) par la
faille de Thau

Figure 54: Schéma conceptuel de la presqu'île de Balaruc-les-bains en situation d'inversac.

7. Bibliographie

- Albéric P. & M. Lepiller.** (1998). Oxydation de la matière organique dans un système karstique alimenté par des pertes fluviales (Loiret, France). *Water Research*, 32, (7), 2051-2064.
- Aquilina L., Ladouche B., Dörfliger N. et Bakalowicz M.** (2003) - Deep water circulation, residence time, and chemistry in a karst complex, *Groundwater*, 41(6), p.790–805.
- Aquilina L., Ladouche B., Dörfliger N., Seidel J. L., Bakalowicz M., Dupuy C. et Le Strat P.** (2002) - Origin, evolution and residence time of saline thermal fluids (Balaruc springs, southern France): implications for fluid transfer across the continental shelf, *Chemical Geology*, 192(1–2), p.1–21.
- Baker, A.** (2002). Fluorescence excitation–emission matrix characterization of river waters impacted by a tissue mill effluent. *Environ Sci Technol* 36(7):1377–1382
- Batiot C., Emblanch C. & Blavoux B.** (2003-b). Carbone Organique Total (COT) et Magnésium (Mg^{2+}) : deux traceurs complémentaires du temps de séjour dans l'aquifère karstique. *C.R. Géosciences*, 335, 205-214
- Batiot-Guilhe C., Seidel J.L., Lafare A., Jourde H., Cordier M.A., Van-Exter S., Rodier C.** (2008). Characterisation of underground flows in karstic aquifers by studying DOM fluorescence. Example of two Mediterranean systems (Lez and Causse d'Aumelas, Southeastern France), *13th IWRA World Water Congress*, 1-4 septembre 2008, Montpellier.
- Blavoux, B., Dazy, J., & Sarrot-Reynauld, J.** (1982). Information about the origin of thermomineral waters and gas by means of environmental isotopes in eastern Azerbaijan, Iran, and southeast France. *Journal of Hydrology*, 56(1-2), 23-38.
- Emblanch C., B. Blavoux, J. Puig & J. Mudry** (1998). Dissolved organic carbon of infiltration within the autogenic karst hydrosystem. *Geophysical Research Letters*, 25, (9), 1459-1462.
- Faure, G.** (1986). Principles of isotope geology. Second edition. *John Wiley & sons*, New York, 588 pp.
- Hathorne, E. C., & James, R. H.** (2006). Temporal record of lithium in seawater: A tracer for silicate weathering? *Earth and Planetary Science Letters*, 246(3-4), 393-406.
- Hemelsdaël R., Séranne M., Caritg S., Courrioux G., Husson E., Jacob T., C. Lamotte** (2021) - Projet DEM'Eaux Thau - Construction d'un modèle géologique 3D du secteur Montpellier-Sète et de la lagune de Thau (34) – Livrable L4 – Rapport final. BRGM/RP-70789-FR
- Hudson N, Baker A, Reynolds D** (2008) Fluorescence analysis of dissolved organic matter in natural, waste and polluted waters— a review. *River Res Appl* 23:631–649

Ladouche B., Dewandel B., Lamotte C., Pezard P., Séranne M. (2022) - Plateforme DEM'Eaux Thau - 1ères acquisitions sur la source de la Vise, forages DEMENT1, DEMENT2, DEMENT3, DEMENT4 – Livrable L10 – Rapport final. BRGM/RP-70842-FR, 162 p., 71 fig., 7 tab., 2 ann.

Ladouche B., Lamotte C., Hemelsdaël R., Pétré M.A., Dewandel B., Léonardi V., Seidel J.L., Séranne M. (2019) - DEM'Eaux Thau - Synthèse et valorisation préliminaire des données sur l'hydrosystème de Thau (34). Rapport final. BRGM/RP-68483-FR, 313 p., 133 fig., 6 tab., 6 Ann.

Lakowicz, J.R. (2006). Principles of fluorescence spectroscopy, 3rd ed. ed. Springer, New York.

Lawaetz, A.J., Stedmon, C.A. (2009). Fluorescence Intensity Calibration Using the Raman Scatter Peak of Water, Appl. Spectrosc, 63, 936–940, <https://doi.org/10.1366/000370209788964548>.

Lee, S., Wolberg, G., Shin, S.Y. (1997). Scattered data interpolation with multilevel B-splines, IEEE Trans. Vis. Comput. Graph. 3, 228–244, <https://doi.org/10.1109/2945.620490>.

Millot R., Scaillet B., Sanjuan B. (2010b) Lithium isotopes in island arc geothermal systems: Guadeloupe, Martinique (French West Indies) and experimental approach. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74: 1852-1871.

Millot, R. (2013). Les isotopes du lithium: exemples d'applications en géochimie (Doctoral dissertation, Université d'Orléans).

Mudarra M., Andreo B., Baker B. (2011). Characterisation of dissolved organic matter in karst spring waters using intrinsic fluorescence: Relationship with infiltration processes. *Science of The Total Environment*, 409, 18, 3448-3462

Murphy, K.R., Stedmon, C.A., Graeber, D., Bro, R. (2013). Fluorescence spectroscopy and multi-way techniques. *PARAFAC, Anal. Methods* 5, 6557, <https://doi.org/10.1039/c3ay41160e>.

Négrel Ph., Petelet-Giraud E., Serra H., Millot R., Kloppmann W. (2004) - Caractéristiques hydrogéochimiques et isotopiques d'eaux thermo-minérales du Massif central. Inventaire du potentiel géothermique de la Limagne (projet COPGEN). BRGM/RP-53597-FR, 165 p., 108 ill.

Personné, J. C., Poty, F., Vaute, L., & Drogue, C. (1998). Survival, transport and dissemination of *Escherichia coli* and enterococci in a fissured environment. Study of a flood in a karstic aquifer. *Journal of Applied Microbiology*, 84(3), 431-438.

Petelet-Giraud, E., Négrel, P., Aunay, B., Ladouche, B., Bailly-Comte, V., Guerrot, C., Flehoc, C. Pézard, P., Lofi, J., & Dörfli, N. (2016). Coastal groundwater salinization: Focus on the vertical variability in a multi-layered aquifer through a multi-isotope fingerprinting (Roussillon Basin, France). *Science of the Total Environment*, 566, 398-415. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.016>

Pétré, M.A., Ladouche B., Seidel J.L., Hemelsdaël R., de Montety V., Batiot-Guilhe C., and Lamotte C. (2020). Hydraulic and geochemical impact of occasional saltwater intrusions through a submarine spring in a karst and thermal aquifer (Balaruc peninsula near Montpellier, France).

Hydrology and Earth System Sciences 24(11): 5656-5672. <https://doi.org/10.5194/hess-24-5655-2020>

Pinault J.L, Doerfliger N, Ladouche B et Bakalowicz M. (2004) - Characterizing a coastal karst aquifer using an inverse modeling approach: The saline springs of Thau, southern France. *Water Resources Research* 40p.

Pucher, M.; Wunsch, U.; Weigelhofer, G.; Murphy, K.; Hein, T.; Graeber, D. (2019). staRdom: Versatile Software for Analyzing Spectroscopic Data of Dissolved Organic Matter in R. *Water*, 11, 2366. <https://doi.org/10.3390/w11112366>

Quiers, M., Batiot-Guilhe, C., Bicalho, C.C. et al. (2014). Characterisation of rapid infiltration flows and vulnerability in a karst aquifer using a decomposed fluorescence signal of dissolved organic matter. *Environ Earth Sci* 71, 553–561. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2731-2>

Ranchoux C., Ladouche B., de Montety V., Seidel J.-L., Pétré M.-A., Hery M., Desoeuvre A., Batiot et Guilhe C., (2021) – DEM'Eaux Thau - Rapport d'analyses géochimiques - Apports des campagnes spatiales 2018- 2019 - Livrable L5a. Rapport final. BRGM/RP-71281-FR, 153 p., 57 fig., 19 tab., 3 ann. (17 tab.).

Widory, D., Petelet-Giraud, E., Negrel, P., Ladouche, B. (2005). Tracking the sources of nitrate in groundwater using coupled nitrogen and boron isotopes: a synthesis., *Environmental Science and Technology*, vol.39, n°2, pp.539-548. <https://doi.org/10.1021/es0493897>

Annexe 1 Analyse de la fluorescence naturelle par spectrofluorimétrie 3D

La fluorescence de la MOD a été analysée grâce à un spectrofluorimètre 3D SHIMADZU® RF-5301 PC au laboratoire HydroSciences Montpellier. Cet équipement a permis d'obtenir pour chaque échantillon d'eau, des matrices d'excitation-émission (EEM) selon la méthode suivante (Batiot et al., 2008 et Quiers et al., 2014) :

- excitation : de 220 à 450 nm, par pas de 10 nm ;
- émission : de 250 à 550 nm par pas de 1 nm.

Des largeurs de fente de 15 nm ont été utilisées pour les monochromateurs avec une vitesse de balayage rapide par défaut. Les échantillons ont été analysés à une température stable de 20°C (cuve dans un bain thermostaté). La stabilité de l'appareil a été vérifiée lors de chaque série d'analyses, sur la base du pic Raman sur de l'eau MilliQ du jour, excitée à 348 nm.

Les résultats d'analyses issus des EEM ont été traités grâce au logiciel R et au paquet staRdom (Pucher et al., 2019). Chaque EEM a été corrigée par une soustraction du blanc (Eau MilliQ du jour d'analyse), une normalisation Raman (Lawaetz et Stedmon, 2009) et suppression de la diffusion (Lakowicz, 2006 ; Murphy et al., 2013). La diffusion supprimée a été interpolée avec une interpolation spline (Lee et al., 1997).

Les différents fluorophores contenus dans chaque EEM ainsi corrigée ont ensuite été déterminés en recherchant l'intensité de fluorescence maximale des pics présents au sein des domaines d'Exc/Em prédéfinis, déterminant individuellement des familles de composés organiques spécifiques (cf figure ci-dessous) :

Nom du Fluorophore	Type		λ Exc (nm)	λ Em (nm)
H2	Humic-like	min	225	400
		max	275	450
H1	Humic-like	min	310	390
		max	365	445
P1	Protein-like	min	260	361
		max	295	396
P1bis	Protein-like	min	220	364
		max	255	399
Trp1 (Tryptophane 1)	Protein-like	min	260	330
		max	290	360
Trp2 (Tryptophane 2)	Protein-like	min	220	340
		max	240	360
Tyr1 (Tyrosine 1)	Protein-like	min	255	300
		max	275	320
Tyr2 (Tyrosine 2)	Protein-like	min	220	290
		max	250	320

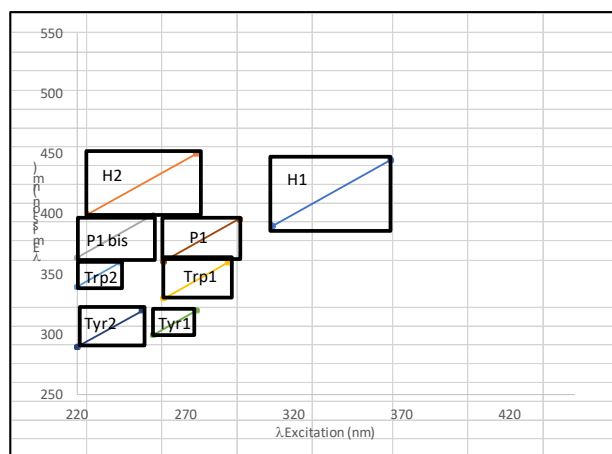


Figure A.1: Domaines de longueurs d'ondes d'Excitation et d'Emission des fluorophores recherchés dans chaque échantillon d'eau

Annexe 2

Résultats des caractérisations multi-isotopiques des campagnes mensuelles (2020) et de l'inversac (2020-2021) des ouvrages suivis dans le projet DEM'Eaux Thau

Listes des tableaux :

A2. 1 : Paramètres physico-chimiques et mesures de coliformes totaux et fécaux des campagnes mensuelles de 2020.....	126
A2. 2: Paramètres physico-chimiques et mesures de coliformes totaux et fécaux du suivis de l'inversac de 2020-2021.....	127
A2. 3: Résultats des analyses de l'intensité de la fluorescence des échantillons de 2018-2021.....	128
A2. 4: Résultats des analyses sur les éléments majeurs des campagnes mensuelles de 2020.....	129
A2. 5: Résultats des analyses sur les éléments majeurs du suivis de l'inversac de 2020-2021.....	130
A2. 6: Résultats des analyses sur les éléments traces des campagnes mensuelles de 2020 (1/2).....	131
A2. 7: Résultats des analyses sur les éléments traces des campagnes mensuelles de 2020 (2/2).....	132
A2. 8: Résultats des analyses sur les éléments traces du suivis de l'inversac de 2020-2021 (1/2).....	133
A2. 9: Résultats des analyses sur les éléments traces du suivis de l'inversac de 2020-2021 (2/2).....	134
A2. 10: Résultats des analyses sur les terres rares (REE) des campagnes mensuelles de 2020.....	135
A2. 11: Résultats des analyses sur les terres rares (REE) du suivis de l'inversac de 2020-2021.....	136
A2. 12: Résultats des analyses isotopiques des campagnes mensuelles de 2020.....	137
A2. 13: Résultats des analyses isotopiques du suivis de l'inversac de 2020-2021.....	138
A2. 14: Résultats des analyses en CFC, SF6 et excès d'air (EA) des campagnes mensuelles de 2020. La conversion en pptv prends en compte une altitude moyenne de recharge de 250 m (1/2).....	139
A2. 15: Résultats des analyses en CFC, SF6 et excès d'air (EA) des campagnes mensuelles de 2020. La conversion en pptv prends en compte une altitude moyenne de recharge de 250 m (2/2).....	140
A2. 16: Résultats des analyses en CFC, SF6 et excès d'air (EA) du suivis de l'inversac de 2020-2021. La conversion en pptv prends en compte une altitude moyenne de recharge de 250 m.....	141
A2. 17: Résultats des analyses des gaz dissous (He, Ne, Ar, O2, N2, CH4 et CO2) des campagnes mensuelles de 2020.....	142
A2. 18: Résultats des analyses des gaz dissous (He, Ne, Ar, O2, N2, CH4 et CO2) du suivis de l'inversac de 2020-2021.....	143

A2. 1 : Paramètres physico-chimiques et mesures de coliformes totaux et fécaux des campagnes mensuelles de 2020.

Nom des échantillons	Date	T °C	pH	Cond µS/cm	PCO2_calc atm	O2 mg/L	TOC mg/L	Coli. Tot. UFC	Coli. Fec. UFC
Ambressac	22/01/2020	15,3	7,2	1524	0,0252	7,5	1,47	65,7	22,6
Cauvy	22/01/2020	16,8	7,2	845	0,0240	6,9		4,1	<1
S12 Ecole	22/01/2020	42,4	6,2	19200	0,4106	0,6	2,82	58,3	2
Vise	22/01/2020	13,5	7,0	12420	0,0384	6,7	0,86	18,7	2
F5	22/01/2020	45,7	6,1	19000	0,4560	0,8	0,47	<1	<1
F6	22/01/2020	19,8	7,0	2640	0,0411	6,3		<1	<1
F15	26/02/2020	39	6,8	25500	0,1040				
Ambressac	26/02/2020	15,6	7,1	1503	0,0303	7,3	1,12	177,7	16
Cauvy	26/02/2020	16,8	7,1	835	0,0294	7,0	1,35	23,1	0
S12 Ecole	26/02/2020	40,4	6,3	18990	0,3112	2,6	0,58	<1	<1
Vise	26/02/2020	15,4	7,0	3870	0,0386	5,7		<1	<1
F5	26/02/2020	43	6,2	19130	0,3571	1,1	0,90	<1	<1
F6	26/02/2020	20,3	7,1	2149	0,0328	5,9	1,58	<1	<1
CGE-Tennis	03/03/2020	17,1	7,2	647	0,0233	6,3	1,64	<1	<1
DEM-T1.1	27/05/2020	19,7	7,1	1980	0,0295	6,0	1,23		
F6	27/05/2020	23,4	6,9	4220	0,0559	5,6	1,48	2	<1
DEM-T1.2	28/05/2020	19,9	7,0	2620	0,0357	6,3	2,26	5,2	<1
CGE-Tennis	28/05/2020	17,5	7,5	645	0,0122	6,4		<1	<1
DEM-T2.1	02/06/2020	24,1	6,5	12360	0,2114	1,0	1,81	6,3	<1
DEM-T2.2	02/06/2020	24,4	6,5	11580	0,1992	1,1	1,31	2	<1
F5	04/06/2020	48,2	6,1	19120	0,4651	0,5	1,08	<1	<1
F6	04/06/2020	22,9	7,0	3500	0,0468	6,4	1,26	1	<1
Vise	04/06/2020	21,3	7,1	2330	0,0345	5,0	1,94	1	<1
S12 Ecole	04/06/2020	44,2	6,2	18980	0,3883	0,4	0,49	1986,3	<1
Ambressac	04/06/2020	24,0	8,2	1580	0,0023	10,6	1,76	2419,6	1413,6
Cauvy	04/06/2020	17,6	7,1	842	0,0287	7,0	2,24	167	1
F5	07/07/2020	46,4	6,2	18990	0,3371	0,8		<1	<1
F6	07/07/2020	23,4	7,1	3320	0,0363	5,4		<1	<1
Vise	07/07/2020	21,6	7,2	2850	0,0239	5,2		<1	<1
CGE-Tennis	07/07/2020	17,7	7,3	641	0,0169	6,0		<1	<1
Ambressac	07/07/2020	20,2	7,9	2022	0,0058	9,6		2419,6	648,8
S12 Ecole	07/07/2020	42,8	6,4	18800	0,2317	3,1		1299,7	<1
Cauvy	07/07/2020	17,8	7,2	832	0,0247	6,4		6,3	1
Ambressac	03/09/2020	18,8	8,0	1919	0,0041	9,5	1,76	172,0	56,5
Cauvy	03/09/2020	17,9	7,3	828	0,0217	6,4	0,67	114,5	1
CGE-Tennis	03/09/2020	17,8	7,4	640	0,0157	5,6		<1	<1
F5	03/09/2020	48,6	6,1	18720	0,4281	0,3	0,71	<1	<1
F6	03/09/2020	22,3	7,0	3460	0,0399	5,3	0,49	<1	<1
S12 Ecole	03/09/2020	43,4	6,1	18690	0,4389	1,3	0,77	<1	<1
Vise	03/09/2020	21,1	7,2	4230	0,0281	4,5	0,63	2	<1
F5	08/10/2020	47,5	6,1	18980	0,4577	1,5	2,64	<1	<1
Vise	08/10/2020	18,7	7,0	4700	0,0437	4,8	2,74	1	<1
F6	08/10/2020	24,7	6,9	4710	0,0586	5,4	1,38	<1	<1
S12 Ecole	08/10/2020	42,2	6,1	19550	0,4955	0,7	2,36	435,2	<1
CGE-Tennis	08/10/2020	17,8	7,1	641	0,0261	6,1	1,78	<1	<1
Ambressac	08/10/2020	19,1	7,5	1811	0,0130	9,4	3,01	579,4	40,8
Cauvy	08/10/2020	19,1	7,1	823	0,0330	6,0	0,71	101,2	<1
F5	05/11/2020	46,3	6,1	19260	0,4641	0,5	0,72	<1	<1
F6	05/11/2020	23,9	7,0	3200	0,0454	5,5	0,57	<1	<1
Vise	12/11/2020	17,3	7,0	12250	0,0406	4,6	1,37	121	13,2
Cauvy	12/11/2020	17,2	7,2	811	0,0230	6,9	0,72	6,3	<1
S12 Ecole	12/11/2020	42,5	6,1	19480	0,4721	0,6	0,83	9,8	<1
CGE-Tennis	12/11/2020	17,2	7,3	640	0,0253	6,1	1,11	<1	<1
Ambressac	12/11/2020	17,3	7,7	1895	0,0089	10,0	1,09	178,5	14,8

A2. 2: Paramètres physico-chimiques et mesures de coliformes totaux et fécaux du suivis de l'inversac de 2020-2021.

Nom des échantillons	Date	T °C	pH	Cond µS/cm	Eh mV	PCO2_calc atm	O2 mg/L	TOC mg/L	Coli. Tot. UFC	Coli. Fec. UFC
Ambressac	03/12/2020	15,9	7,5	1975		0,0145	9,1	0,78	1553,1	8,4
Cauvy	03/12/2020	16,9	7,0	1632		0,0398	6,1	0,90	143,9	<1
F3	03/12/2020	35,5	6,1	18060		0,4820	0,3	1,45	<1	<1
F4 Hôtel	03/12/2020	24,1	6,9	2990		0,0489	5,9	1,62	<1	<1
S12 Ecole	03/12/2020	33,8	6,4	14050		0,1997	2,4	0,80	21,6	4,1
DEMT1	04/12/2020			3500		0,2580		0,82	<1	<1
F5	04/12/2020	46,5	5,9	19450		0,8248	1,2	0,42	<1	<1
F6	04/12/2020	22,7	6,9	4090		0,0495	5,7	0,38	<1	<1
Ambressac	10/12/2020	15,5	7,5	2300		0,0128	9,0	1,04	101,7	7,4
Cauvy	10/12/2020	16,1	7,1	3690		0,0310	5,9	2,47	88,4	<1
S12 Ecole	10/12/2020	35,3	6,5	25100		0,1334	3,3	0,86	8,6	<1
Ambressac	15/12/2020	16,6	7,5	2370		0,0137	9,2	2,21	122,3	17,1
Cauvy	15/12/2020	17,2	7,0	4120		0,0335	5,7	2,21	54,5	<1
F5	15/12/2020	46,5	6,1	21370		0,4948	0,8	0,59	<1	<1
F6	15/12/2020	21,9	7,1	10370		0,0345	6,1	1,92	2	<1
S12 Ecole	15/12/2020	36,4	6,5	30800		0,1222	4,0	0,71	6,3	1
Ambressac	07/01/2021	15,1	7,5	2630		0,0136	9,2	1,40		
Cauvy	07/01/2021	17	7,0	5130		0,0406	5,5	1,21		
F3	07/01/2021	36,8	6,3	34000		0,2544	1,6	1,73		
F4 Hôtel	07/01/2021	24,4	6,7	19650		0,1355	5,2	1,76		
S12 Ecole	07/01/2021	40	6,4	43600		0,1653	3,3	1,99		
Vise/Lagune	07/01/2021	5,7	8,2	58200		0,0011	11,6	2,23		
DEMT1	08/01/2021	20,3	6,9	30200		0,0494	7,1	1,24		
F5	08/01/2021	46,7	6,0	22100		0,5610	0,8	0,68		
F6	08/01/2021	21,8	6,8	20660		0,0685	6,5	0,82		
DEMT3-1	11/01/2021	22	7,0	25100	-39,0	0,0438	0,4	2,26	117,8	<1
DEMT3-2	12/01/2021	22,1	6,9	27300	-96,0	0,0545	0,3	0,40	61,3	<1
Ambressac	11/02/2021	15,2	7,4	2480			8,9	1,58	1203,3	101,7
Cauvy	11/02/2021	16	7,0	6820			5,8	1,39	3,1	<1
S12 Ecole	11/02/2021	39,2	6,6	44500			7,0	1,25	16	<1
F4 Hôtel	11/02/2021	23,3	6,9	24200			5,6	1,94	<1	<1
F6	11/02/2021	21,6	6,9	23800			6,6	0,93	<1	<1
F4 Hôtel	29/06/2021	23,8	7,01	23600			6,0	2,38	<1	<1
F5	29/06/2021	30,1	6,66	25900			4,1	1,35	16	9,7
F6	29/06/2021	22,1	6,91	22600			5,3	1,95	32,3	10,8
F9	29/06/2021	48,9	6,13	20980			0,1	0,34	<1	<1
Vise/Lagune	29/06/2021	24,6	8,04	58200			5,1	3,82	>2419,6	>2419,6
S12 Ecole	30/06/2021	40,2	6,27	29000			2,3	1,46	<1	<1
Cauvy	30/06/2021	19,4	6,95	9460			6,0	0,78	16	<1
DEMT4-0	22/09/2021	/	7,56	4190						
DEMT4-1 T0+4h	15/11/2021	25,9	7,23	5820				1,16	4,1	<1
DEMT4-1 T0+24h	16/11/2021	26,3	7,19	11360				0,72	2	<1
F4 Hôtel	16/11/2021	22,6	7,11	26400				2,18	<1	<1
F5	16/11/2021	43,7	6,15	23600				1,03	<1	<1
F6	16/11/2021	20,9	7,19	27200				1,30	<1	<1
DEMT4-2 T0+4h	17/11/2021	27,6	7	7340				0,89	18,7	<1
DEMT4-2 T0+24h	18/11/2021	27	7,04	11150				0,76	2	<1
S12 Ecole	24/11/2021	36,6	6,66	45400				0,96	4,1	<1

A2. 3: Résultats des analyses de l'intensité de la fluorescence des échantillons de 2018-2021.

Campagne	Nom des échantillons	Fluo Totale	Humic-like	Protein-Like	M	TDS	COT
						mg/L	
Mars 2018	F4 hôtel	0,391	0,045	0,324	0,021	3251	1,75
	F5	0,193	0,023	0,161	0,010	11820	1,81
	F6	0,508	0,059	0,422	0,027	2661	2,25
	F8	0,736	0,062	0,631	0,043	16887	1,76
	F9	0,275	0,023	0,243	0,010	11684	2,18
	F14	0,613	0,039	0,548	0,025	11854	1,55
	S12	0,234	0,030	0,185	0,020	12020	1,63
	P4_La_Balme	1,253	0,144	1,028	0,081	618	2,27
	Issanka	0,611	0,134	0,421	0,055	545	2,12
	Vène	0,710	0,163	0,481	0,066	561	1,88
	CGE-Tennis	0,289	0,028	0,250	0,012	545	2,19
	Ambressac	0,666	0,171	0,426	0,069	1679	3,97
	Cauvy	0,425	0,103	0,280	0,042	750	1,85
	Pézenas	1,023	0,066	0,890	0,068	456	2,47
Rouvierette	0,936	0,184	0,670	0,082	656	1,78	
Aout 18	F4 hôtel	1,732	0,153	1,502	0,076	2093	6,56
	F5	0,655	0,036	0,596	0,024	11705	0,21
	F6	0,630	0,058	0,542	0,030	2218	0,85
	F8	0,669	0,084	0,542	0,043	16458	0,37
	F9	0,558	0,033	0,505	0,020	11628	0,54
	F14	0,587	0,036	0,528	0,023	11886	1,31
	S12	0,129	0,027	0,091	0,011	11500	0,58
	P4_La_Balme	0,730	0,084	0,602	0,043	628	0,78
	Issanka	0,487	0,069	0,389	0,029	556	1,43
	Vène						
	CGE-Tennis	0,313	0,033	0,264	0,016	569	1,07
	Ambressac	0,478	0,154	0,264	0,060	1204	0,97
	Cauvy	0,274	0,064	0,183	0,027	713	0,30
	Pézenas	0,768	0,047	0,690	0,031	486	0,73
Rouvierette							
Stade Michel	0,359	0,049	0,285	0,026	9579	NA	
Mensuelle Hors Inversac	DEM-T1.1-Mai20	0,253	0,067	0,153	0,033		1,23
	DEM-T1.2-Mai20	0,228	0,066	0,133	0,029		2,26
	DEM-T2.1-Juin20	0,591	0,065	0,437	0,089		1,81
	DEM-T2.2-Juin20	0,149	0,046	0,085	0,019		1,31
	Vise-Juin20	0,437	0,089	0,294	0,054		1,94
Inversac	DEMT1-Dec20	0,281	0,058	0,195	0,028		0,82
	DEMT1-Jan21	0,415	0,112	0,251	0,052		1,24
	Vise/Lagune-Jan21	0,564	0,157	0,340	0,067		2,23
	DEMT3-1	0,812	0,109	0,631	0,072		2,26
	DEMT3-2	0,704	0,080	0,563	0,061		0,40
	DEMT4-1 T0+4h	0,819	0,097	0,661	0,061		1,16
	DEMT4-1 T0+24h	0,726	0,094	0,592	0,040		0,72
	DEMT4-2 T0+4h	0,693	0,081	0,572	0,039		0,89
	DEMT4-2 T0+24h	0,662	0,065	0,561	0,036		0,76

A2. 4: Résultats des analyses sur les éléments majeurs des campagnes mensuelles de 2020.

Nom des échantillons	Date	SiO2	Cl	Na	K	Br	SO4	HCO3	Ca	Mg	NO3
		mg/L									
Ambressac	22/01/2020	7,1	254,6	136,2	6,8	1,1	64,2	386,7	122,8	31,0	15,3
Cauvy	22/01/2020	7,7	72,6	39,3	2,0	0,3	29,3	367,2	109,7	16,1	8,7
S12 Ecole	22/01/2020	31,1	6153,4	3118,5	111,1	23,4	925,9	587,3	623,5	321,2	<LD
Vise	22/01/2020	9,0	3863,6	2083,0	85,9	15,9	584,5	346,2	201,1	277,6	4,0
F5	22/01/2020	29,5	8183,2	3953,0	122,0	30,9	1541,2	581,4	902,7	480,2	<LD
F6	22/01/2020	9,9	594,0	297,1	10,7	2,3	116,1	397,4	138,0	52,2	5,2
F15	26/02/2020	NA	8274,6	4396,7	151,5	31,7	1166,5	634,4	606,4	404,6	<LD
Ambressac	26/02/2020	7,5	188,2	142,0	7,0		50,2	394,8	83,1	33,4	12,7
Cauvy	26/02/2020	8,0	53,5	39,6	2,0		22,4	366,9	111,2	16,5	5,9
S12 Ecole	26/02/2020	NA	5820,3	3068,3	106,3	24,4	866,8	586,8	553,8	312,7	<LD
Vise	26/02/2020	NA	971,1	505,2	18,3	3,4	166,6	382,2	139,0	79,6	5,5
F5	26/02/2020	NA	5636,3	3108,2	109,6	21,9	859,7	573,1	540,9	315,6	<LD
F6	26/02/2020	10,1	413,3	226,1	8,5	6,4	91,1	381,1	93,5	45,6	<LD
CGE-Tennis	03/03/2020	8,4	19,8	11,7	0,8		17,7	392,0	94,7	18,6	<LD
DEM-T1.1	27/05/2020	8,9	378,7	208,1	7,7	1,4	84,7	375,8	120,6	43,3	6,1
F6	27/05/2020	11,6	1007,8	543,3	19,0	4,1	181,3	419,6	171,8	74,8	4,5
DEM-T1.2	28/05/2020	9,0	563,1	308,5	11,3	1,8	107,9	378,3	130,8	50,5	8,1
CGE-Tennis	28/05/2020	8,1	19,4	11,8	0,7	0,1	17,4	355,4	94,8	18,9	<LD
DEM-T2.1	02/06/2020	21,2	3592,5	1840,7	41,2	4,5	578,6	631,9	524,8	207,9	<LD
DEM-T2.2	02/06/2020	22,2	3223,7	1655,4	37,6	6,8	535,0	609,4	472,0	188,3	<LD
F5	04/06/2020	28,8	5683,5	3013,4	104,7	19,2	870,2	553,4	585,5	304,8	<LD
F6	04/06/2020	10,2	760,4	413,8	15,3	6,7	141,3	412,7	149,2	62,1	<LD
Vise	04/06/2020	9,2	462,7	248,8	9,0	5,9	98,8	391,9	129,4	49,0	<LD
S12 Ecole	04/06/2020	28,6	5805,3	3072,4	102,8	20,6	898,3	581,6	593,0	309,8	<LD
Ambressac	04/06/2020	7,1	247,2	156,3	7,3	0,8	60,8	338,4	100,8	34,2	10,7
Cauvy	04/06/2020	7,8	48,9	38,6	1,9	0,2	22,2	374,5	114,7	17,5	6,4
F5	07/07/2020	26,3	5728,5	2965,2	113,2	19,1	853,4	566,6	562,7	300,6	
F6	07/07/2020	10,1	758,2	395,6	16,2	6,7	138,3	412,7	148,0	60,6	6,1
Vise	07/07/2020	9,4	664,5	352,4	13,5	6,4	122,6	392,4	127,5	60,6	6,5
CGE-Tennis	07/07/2020	8,1	21,4	11,6	0,9	<LD	18,6	357,2	95,3	18,6	5,9
Ambressac	07/07/2020	7,3	377,1	199,0	8,8	1,5	80,9	414,8	125,2	37,1	12,6
S12 Ecole	07/07/2020	41,2	5737,8	2986,2	132,2	19,8	848,5	563,0	563,5	300,9	33,0
Cauvy	07/07/2020	8,1	61,2	35,1	2,1	<LD	27,1	379,2	109,4	15,5	6,4
Ambressac	03/09/2020	6,9	366,1	182,9	8,6	1,3	82,1	397,5	133,9	36,3	13,4
Cauvy	03/09/2020	7,8	66,5	36,6	1,9	0,2	28,7	373,0	112,4	16,0	7,8
CGE-Tennis	03/09/2020	8,3	22,7	11,6	0,8	0,1	19,5	348,6	96,5	18,9	5,8
F5	03/09/2020	27,9	5924,0	3055,0	107,1	19,3	872,6	558,5	578,7	309,4	<LD
F6	03/09/2020	10,3	847,6	428,1	14,7	2,9	154,6	404,2	158,0	65,3	5,1
S12 Ecole	03/09/2020	26,7	6036,7	2996,0	102,9	20,7	893,6	572,6	576,2	304,6	<LD
Vise	03/09/2020	8,9	1099,5	572,7	24,5	3,9	183,0	483,9	131,7	88,6	5,0
F5	08/10/2020	28,6	5805,5	2997,7	112,5	18,9	856,9	557,3	595,9	299,0	17,3
Vise	08/10/2020	8,8	1161,6	637,5	25,1	3,8	193,5	376,5	136,0	95,5	3,6
F6	08/10/2020	11,0	1148,5	622,2	22,9	3,8	196,7	420,1	179,7	79,4	3,4
S12 Ecole	08/10/2020	27,9	5874,8	3009,0	118,0	18,7	871,9	631,7	608,9	300,3	14,5
CGE-Tennis	08/10/2020	8,0	22,5	11,5	0,8		18,5	340,4	93,2	18,4	5,9
Ambressac	08/10/2020	7,0	336,0	176,0	8,0	1,1	77,2	397,7	135,5	35,5	14,0
Cauvy	08/10/2020	8,0	62,6	35,6	1,9	0,2	29,1	358,3	110,0	15,7	8,5
F5	05/11/2020	27,8	5944,8	2911,7	108,3	21,6	869,4	578,2	571,9	305,6	<LD
F6	05/11/2020	10,4	724,0	365,4	14,5	2,4	135,6	419,0	143,7	58,5	3,6
Vise	12/11/2020	13,6	3446,8	1914,0	75,2	14,7	548,1	366,2	186,2	250,0	2,9
Cauvy	12/11/2020	9,1	63,0	34,2	1,9	0,2	28,6	369,4	106,0	15,5	8,6
S12 Ecole	12/11/2020	32,1	6007,9	2904,5	108,3	21,4	876,2	588,2	569,3	304,5	<LD
CGE-Tennis	12/11/2020	11,4	23,0	11,3	0,9	0,1	18,8	353,4	91,6	18,2	6,1
Ambressac	12/11/2020	10,5	362,3	180,3	8,1	1,5	81,1	410,2	135,1	36,4	14,0

A2. 5: Résultats des analyses sur les éléments majeurs du suivis de l'inversac de 2020-2021.

Nom des échantillons	Date	SiO2 mg/L	Cl	Na	K	Br	SO4	HCO3	Ca	Mg	NO3
Ambressac	03/12/2020	7,6	398,1	202,7	9,6	1,2	86,7	413,8	139,3	40,1	13,9
Cauvy	03/12/2020	8,7	298,4	142,4	5,0	0,9	69,0	376,0	141,6	28,7	10,4
F3	03/12/2020	NA	5769,1	2950,6	106,5		840,9	628,8	546,8	331,3	<LD
F4 Hôtel	03/12/2020	10,9	701,4	362,2	15,0	2,1	126,5	402,4	141,7	59,0	2,8
S12 Ecole	03/12/2020	NA	4365,5	2222,8	87,9	13,5	630,7	496,3	362,7	253,6	<LD
DEMT1	04/12/2020	NA	950,2	486,9	20,2	2,9	162,7	497,9	148,9	74,0	3,1
F5	04/12/2020	NA	6273,8	3184,3	124,7	21,6	910,9	564,7	560,2	340,0	<LD
F6	04/12/2020	10,3	1048,0	538,5	21,3	3,1	171,2	398,5	150,6	78,7	3,0
Ambressac	10/12/2020	8,1	476,9	247,0	11,8	6,5	102,0	410,5	147,7	45,8	18,3
Cauvy	10/12/2020	8,9	927,3	473,5	11,6	3,3	154,9	404,3	220,1	67,1	10,2
S12 Ecole	10/12/2020	NA	8304,5	4258,2	170,8	25,5	1147,1	427,1	387,3	509,2	<LD
Ambressac	15/12/2020	8,5	505,2	278,6	12,9	2,2	106,4	448,6	160,9	51,3	13,5
Cauvy	15/12/2020	8,2	1127,7	519,8	13,2	5,5	179,0	355,1	212,5	71,6	10,5
F5	15/12/2020	NA	6665,5	3589,8	139,6	19,8	960,2	549,4	597,0	388,1	<LD
F6	15/12/2020	NA	3137,5	1616,3	65,1	10,2	466,7	391,5	209,0	214,8	<LD
S12 Ecole	15/12/2020	NA	10648,4	5439,5	217,2	30,9	1445,9	409,9	428,0	655,5	<LD
Ambressac	07/01/2021	7,7	596,5	294,5	12,3	2,0	119,3	414,7	158,4	51,6	12,8
Cauvy	07/01/2021	8,4	1454,9	673,9	16,3	4,8	221,9	358,4	234,2	90,4	7,6
F3	07/01/2021	NA	10372,3	5270,4	190,7	33,8	1440,4	538,2	545,1	617,3	<LD
F4 Hôtel	07/01/2021	NA	6574,9	3381,4	128,9	20,9	944,9	672,2	334,5	420,7	<LD
S12 Ecole	07/01/2021	NA	15508,3	8047,0	317,5	50,1	2130,0	366,2	515,4	956,9	<LD
Vise/Lagune	07/01/2021	NA	21953,4	11629,8	471,8	77,0	3032,2	167,9	478,6	1404,1	<LD
DEMT1	08/01/2021	2,86	10395,0	5308,2	201,6	35,3	1428,7	362,5	352,0	652,0	<LD
F5	08/01/2021	NA	7262,9	3609,6	142,8	25,7	1036,1	581,3	590,1	383,7	<LD
F6	08/01/2021	NA	6851,6	3476,1	130,1	22,0	964,2	399,1	317,7	451,6	<LD
DEMT3-1	11/01/2021	3,76	8629,1	4412,0	182,1	27,7	1183,3	386,5	436,1	470,0	<LD
DEMT3-2	12/01/2021	3,94	9820,6	4978,7	204,3	31,2	1324,1	390,7	487,4	514,9	<LD
Ambressac	11/02/2021	NA	563,4	288,2	10,9	2,0	105,5	398,2	144,5	49,5	13,0
Cauvy	11/02/2021	NA	2020,6	956,8	22,1	6,7	292,2	345,1	260,1	125,7	9,0
S12 Ecole	11/02/2021	NA	15714,3	8292,7	307,1	52,9	2149,1	356,8	507,4	996,6	<LD
F4 Hôtel	11/02/2021	NA	8173,6	4222,5	146,5	29,6	1136,0	387,0	338,3	526,4	0,3
F6	11/02/2021	NA	8141,1	4208,6	146,9	24,8	1126,9	363,7	323,8	527,0	3,5
F4 Hôtel	29/06/2021	NA	8144,5	4044,1	147,7	33,0	1133,1	342,5	306,8	500,8	<LQ
F5	29/06/2021	NA	9111,5	4543,4	164,0	33,2	1266,5	360,6	358,3	542,7	<LQ
F6	29/06/2021	NA	8075,5	4033,3	149,4	30,3	1127,2	357,3	318,9	490,6	<LQ
F9	29/06/2021	NA	7036,2	3363,8	125,2	24,6	1019,8	557,8	579,2	350,2	<LQ
Vise/Lagune	29/06/2021	NA	20617,7	11632,3	400,1	81,1	3085,2	152,5	505,8	1389,7	<LQ
S12 Ecole	30/06/2021	NA	9971,1	4940,4	171,6	36,3	1407,1	529,2	562,2	545,8	<LQ
Cauvy	30/06/2021	NA	3075,8	1488,2	40,4	11,2	446,2	345,3	276,3	184,5	<LQ
DEMT4-0	22/09/2021	NA	1365,6	284,6	17,2	4,3	45,7		277,4	167,4	<LQ
DEMT4-1 T0+4h	15/11/2021	7,2	1808,6	443,1	25,3	5,4	58,8	291,1	334,9	210,6	<LQ
DEMT4-1 T0+24h	16/11/2021	6,5	3750,8	1516,0	61,9	11,3	346,8	303,2	379,9	308,5	<LQ
F4 Hôtel	16/11/2021	NA	9571,6	4851,2	169,1	29,7	1311,7	339,4	390,3	610,3	<LQ
F5	16/11/2021	NA	7975,1	3978,7	138,6	24,3	1127,6	522,4	587,0	448,5	<LQ
F6	16/11/2021	NA	9801,5	4992,3	177,5	30,1	1332,4	331,5	364,5	626,3	<LQ
DEMT4-2 T0+4h	17/11/2021	7,1	2389,2	744,4	34,1	7,3	137,7	275,7	345,1	238,4	<LQ
DEMT4-2 T0+24h	18/11/2021	6,9	3802,8	1532,4	64,1	11,2	353,0	313,2	373,1	313,7	<LQ
S12 Ecole	24/11/2021	NA	16900,7	8637,6	308,9	55,1	2296,4	326,8	552,8	1033,6	<LQ

A2. 6: Résultats des analyses sur les éléments traces des campagnes mensuelles de 2020 (1/2).

Nom des échantillons	Date	Li	B	Al	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As
µg/L													
Ambressac	22/01/2020	4,69	112,66	1,85	0,56	0,23	1,69	<LD	0,06	0,25	0,34	2,35	0,56
Cauvy	22/01/2020	2,33	47,08	0,47	0,57	0,29	0,17	<LD	0,03	0,15	0,10	0,58	0,17
S12 Ecole	22/01/2020	145,57	977,79	1,63	1,13	0,08	31,58	3,39	0,26	2,68	4,24	4,67	0,42
Vise	22/01/2020	34,49	923,07	1,31	0,88	0,33	0,59	1,86	0,02	0,40	1,06	2,94	0,39
F5	22/01/2020	147,31	952,58	8,82	0,79	0,14	33,49	78,32	0,67	2,66	3,74	44,16	0,39
F6	22/01/2020	12,17	119,69	0,78	0,63	0,26	0,03	<LD	0,01	0,32	0,34	1,71	0,20
F15	26/02/2020	216,99	1385,17	2,29	0,25	0,09	161,32	143,99	1,84	11,66	0,94	26,11	0,06
Ambressac	26/02/2020	4,80	114,73	2,65	0,57	0,26	1,67	1,66	0,04	0,27	0,31	<LD	0,62
Cauvy	26/02/2020	2,59	48,53	0,98	0,62	0,51	0,19	3,76	0,05	0,24	0,12	<LD	0,18
S12 Ecole	26/02/2020	145,77	945,88	1,00	1,13	0,16	15,59	2,15	0,10	2,46	4,02	5,28	0,36
Vise	26/02/2020	11,56	197,76	3,18	0,76	0,32	0,18	<LD	0,02	0,29	0,52	3,00	0,20
F5	26/02/2020	145,72	983,25	0,34	0,82	0,10	32,65	69,12	0,53	2,51	5,57	3,50	0,47
F6	26/02/2020	8,62	104,33	<LD	0,71	0,29	0,06	<LD	<LD	0,22	0,31	<LD	0,20
CGE-Tennis	03/03/2020	1,64	21,25	0,41	0,64	0,74	0,05	1,08	0,01	0,31	0,06	<LD	0,14
DEM-T1.1	27/05/2020	7,06	104,01	1,91	0,63	0,35	0,07	1,57	0,11	0,37	0,15	3,50	0,19
F6	27/05/2020	22,41	216,38	4,60	0,50	0,27	0,59	0,64	0,06	0,48	2,74	2,52	0,25
DEM-T1.2	28/05/2020	11,74	160,88	2,59	0,68	0,39	2,06	11,37	0,02	0,39	0,18	1,51	0,19
CGE-Tennis	28/05/2020	1,56	20,20	0,53	0,57	0,63	0,04	0,73	0,01	0,23	0,06	0,56	0,12
DEM-T2.1	02/06/2020	98,95	614,02	11,06	0,79	0,05	113,35	2,38	1,33	1,04	1,26	3,33	0,42
DEM-T2.2	02/06/2020	94,68	635,42	12,89	0,76	0,08	110,57	1,95	1,25	0,88	1,50	3,32	0,31
F5	04/06/2020	156,63	987,03	12,18	0,83	0,48	28,76	81,10	0,52	3,62	2,76	3,38	0,43
F6	04/06/2020	17,21	176,46	10,21	0,45	0,54	0,15	2,56	0,02	0,74	0,96	6,55	0,21
Vise	04/06/2020	8,23	106,87	1,80	0,75	0,29	0,12	0,49	0,02	0,47	0,64	3,04	0,15
S12 Ecole	04/06/2020	161,42	971,59	5,88	1,11	0,44	40,54	5,43	0,55	3,70	0,26	3,13	0,35
Ambressac	04/06/2020	4,97	123,80	3,44	0,63	0,20	2,78	6,05	0,06	0,35	0,40	1,30	3,07
Cauvy	04/06/2020	2,57	51,02	0,89	0,57	0,32	0,12	1,33	0,04	0,23	0,14	0,96	0,19
F5	07/07/2020	154,11	938,27	16,91	0,92	0,64	31,04	87,48	0,53	2,31	2,94	4,10	0,42
F6	07/07/2020	16,42	163,34	3,83	0,49	0,38	0,12	1,77	0,02	0,41	0,18	3,82	0,24
Vise	07/07/2020	10,72	164,93	1,54	0,79	0,33	0,14		0,01	0,35	0,44	2,69	0,22
CGE-Tennis	07/07/2020	1,42	20,98	0,85	0,60	0,68	0,05	1,15	0,02	0,19	0,06	0,92	0,13
Ambressac	07/07/2020	7,06	140,54	2,27	0,57	0,27	1,61	3,77	0,05	0,35	0,39	2,35	0,92
S12 Ecole	07/07/2020	150,63	927,60	17,65	1,73	0,97	29,82	28,13	0,39	3,17	3,00	3,07	0,35
Cauvy	07/07/2020	2,28	97,49	0,81	0,62	0,35	0,23	2,74	0,04	0,20	0,13	0,88	0,16
Ambressac	03/09/2020	6,29	118,19	0,84	0,61	0,35	3,44	7,00	0,08	0,33	0,36	6,84	1,75
Cauvy	03/09/2020	2,66	44,87	0,20	0,62	0,33	0,15	1,46	0,04	0,17	0,05	0,93	0,15
CGE-Tennis	03/09/2020	1,44	18,77	0,52	0,65	0,77	0,05	2,12	0,03	0,28	0,04	1,36	0,14
F5	03/09/2020	170,75	947,90	3,96	1,13	0,38	33,40	82,89	0,83	2,04	0,94	2,40	0,41
F6	03/09/2020	18,28	146,91	1,52	0,51	0,28	0,09	2,95	0,07	0,23	0,35	6,76	0,23
S12 Ecole	03/09/2020	156,62	912,80	2,36	1,23	0,26	30,01	16,59	0,36	3,25	1,33	3,05	0,23
Vise	03/09/2020	12,72	236,37	2,83	0,88	0,40	0,24	4,52	0,06	1,16	0,11	5,19	0,27
F5	08/10/2020	145,44	940,55	10,52	1,01	0,30	28,98	83,19	0,50	2,32	3,08	2,74	0,37
Vise	08/10/2020	14,92	265,52	3,87	0,86	0,32	0,32	1,16	0,02	0,42	0,55	2,61	0,22
F6	08/10/2020	28,28	215,39	2,82	0,40	0,31	0,06	0,66	0,01	0,45	0,16	1,34	0,26
S12 Ecole	08/10/2020	147,88	939,11	30,16	1,44	0,45	53,66	10,79	1,09	2,70	1,54	5,05	0,41
CGE-Tennis	08/10/2020	1,36	18,45	0,50	0,55	0,58	0,03	0,79	0,01	0,14	0,05	0,55	0,13
Ambressac	08/10/2020	5,52	118,02	1,94	0,54	0,24	1,80	<LOD	0,04	0,31	0,38	2,27	0,88
Cauvy	08/10/2020	2,02	45,61	1,15	0,56	0,32	0,15	1,89	0,04	0,20	0,24	1,77	0,17
F5	05/11/2020	158,80	1036,51		0,68		26,22	68,15	0,50	2,29	1,15	2,55	0,60
F6	05/11/2020	16,95	162,72		0,43	0,24	0,12	3,21	0,01	0,33	0,18	1,50	0,21
Vise	12/11/2020	38,91	868,35		0,89	0,52	0,91	3,14	0,02	0,80	1,23	2,49	0,23
Cauvy	12/11/2020	2,79	54,94	0,59	0,66	0,36	0,12		0,05	0,20	0,10	0,62	0,16
S12 Ecole	12/11/2020	175,68	1056,43		1,00		46,69	29,98	1,04	2,98	1,49	2,77	3,90
CGE-Tennis	12/11/2020	1,93	26,46	0,50	0,83	0,88	0,03		0,01	0,25	0,07	0,82	0,14
Ambressac	12/11/2020	9,10	173,24	0,78	0,80	0,35	1,65		0,06	0,41	0,49	1,76	0,76

A2. 7: Résultats des analyses sur les éléments traces des campagnes mensuelles de 2020 (2/2).

Nom des échantillons	Date	Rb	Sr	Y	Mo	Cd	Sb	Cs	Ba	Th	Pb	U
µg/L												
Ambressac	22/01/2020	1,93	248,93	0,10	0,28	0,01		0,02	10,45	0,48	0,10	0,48
Cauvy	22/01/2020	0,74	145,92	0,08	0,17	0,01		0,01	9,09	0,47	<LD	0,47
S12 Ecole	22/01/2020	46,58	4460,72	0,21	1,29	0,04		5,03	80,39	1,59	0,25	1,59
Vise	22/01/2020	21,36	1625,91	0,09	2,08	<LD		0,16	15,29	1,20	0,05	1,20
F5	22/01/2020	46,13	4489,74	0,19	1,33	0,02		5,15	79,43	1,63	0,32	1,63
F6	22/01/2020	4,26	549,52	0,10	0,40	0,01		0,20	17,01	0,80	<LD	0,80
F15	26/02/2020	40,95	4222,53	7,95	0,05	0,04		1,18	21,88		<LD	1,94
Ambressac	26/02/2020	1,94	223,37	0,10	0,34	0,02		0,01	10,43		0,37	0,51
Cauvy	26/02/2020	0,73	140,64	0,07	0,22	0,01		0,01	9,12		0,12	0,51
S12 Ecole	26/02/2020	47,00	4507,68	1,36	0,03	0,07		5,08	79,86		0,23	1,72
Vise	26/02/2020	5,99	629,45	0,09	0,59	0,02		0,15	17,83		0,10	0,85
F5	26/02/2020	46,18	4390,73	1,30	0,19	0,03		5,37	80,38		0,75	1,61
F6	26/02/2020	3,39	412,98	0,10	0,45	0,01		0,14	15,28		0,58	0,83
CGE-Tennis	03/03/2020	0,57	164,00	0,10	0,22	0,00		0,01	14,11		0,05	0,54
DEM-T1.1	27/05/2020	3,04	334,06	0,09	0,38	0,01		0,11	15,08		0,05	0,71
F6	27/05/2020	8,37	835,72	0,08	0,67	0,01		0,60	22,38		0,13	0,96
DEM-T1.2	28/05/2020	4,08	412,96	0,11	0,37	0,01		0,20	16,26		0,05	0,66
CGE-Tennis	28/05/2020	0,50	136,66	0,09	0,17	0,00		0,00	12,75		0,03	0,47
DEM-T2.1	02/06/2020	5,70	3126,09	0,05	1,15	0,02		0,01	77,12		0,05	5,79
DEM-T2.2	02/06/2020	4,45	3008,70	0,03	1,04	0,01		0,01	64,90		0,05	5,48
F5	04/06/2020	47,94	4463,77	0,20	1,42	0,02		5,26	81,00		0,55	1,56
F6	04/06/2020	5,96	628,05	0,07	0,56	0,01		0,35	17,43		0,15	0,79
Vise	04/06/2020	3,34	399,51	0,11	0,35	0,01		0,11	17,14		0,08	0,76
S12 Ecole	04/06/2020	48,73	4484,36	0,19	1,43	0,06		5,31	81,69		0,60	1,53
Ambressac	04/06/2020	2,16	230,53	0,02	0,62	0,00		0,02	6,12		0,15	0,47
Cauvy	04/06/2020	0,67	129,43	0,08	0,17	0,01		0,01	8,89		0,03	0,47
F5	07/07/2020	51,58	4779,79	0,18	1,43	0,02		5,85	93,98		0,19	1,87
F6	07/07/2020	5,71	645,38	0,08	0,57	0,01		0,31	17,97		0,24	0,83
Vise	07/07/2020	4,82	504,55	0,10	0,49	0,01		0,13	16,84		0,08	0,82
CGE-Tennis	07/07/2020	0,50	128,29	0,10	0,17	0,00		0,01	12,80		0,03	0,48
Ambressac	07/07/2020	2,63	392,12	0,10	0,32	0,01		0,03	14,01		0,16	0,52
S12 Ecole	07/07/2020	52,36	4747,53	0,26	1,79	0,04		5,62	91,64		0,20	1,99
Cauvy	07/07/2020	0,68	134,25	0,08	0,17	0,01		0,01	9,14		0,04	0,49
Ambressac	03/09/2020	2,40	338,75	0,11	0,34	0,01		0,02	12,40		0,09	0,48
Cauvy	03/09/2020	0,63	125,93	0,08	0,17	0,00		0,01	8,29		0,02	0,43
CGE-Tennis	03/09/2020	0,49	139,60	0,10	0,19	0,01		0,00	12,54		0,01	0,45
F5	03/09/2020	48,90	4789,54	0,47	1,75	0,02		5,30	80,70		0,29	1,71
F6	03/09/2020	5,93	692,89	0,12	0,57	0,01		0,34	17,86		0,10	0,85
S12 Ecole	03/09/2020	47,03	4659,17	0,29	1,48	0,04		4,97	77,40		0,40	1,56
Vise	03/09/2020	6,99	631,39	0,14	0,82	0,01		0,11	16,87		0,13	0,79
F5	08/10/2020	48,24	4517,21	0,21	1,40	0,02		5,58	85,87		0,17	1,76
Vise	08/10/2020	7,90	667,93	0,09	0,78	0,01		0,14	17,00		0,03	0,95
F6	08/10/2020	9,50	903,34	0,07	0,81	0,01		0,73	21,01		0,02	0,96
S12 Ecole	08/10/2020	49,36	4538,88	0,23	1,35	0,04		5,47	88,00		0,27	1,80
CGE-Tennis	08/10/2020	0,48	132,20	0,10	0,15	0,00		0,01	13,10		0,02	0,46
Ambressac	08/10/2020	2,29	341,29	0,12	0,29	0,01		0,02	12,70		0,13	0,51
Cauvy	08/10/2020	0,64	136,94	0,08	0,16	0,01		0,01	9,14		0,05	0,46
F5	05/11/2020	49,78	5107,84	0,19	1,24	0,02		4,51	95,88		0,13	1,94
F6	05/11/2020	5,93	623,70	0,07	0,56	0,00		0,31	18,25		0,02	0,83
Vise	12/11/2020	22,64	1881,04	0,12	2,85	0,01		0,30	21,96		0,05	1,31
Cauvy	12/11/2020	0,65	128,58	0,09	0,19	0,01		0,01	8,55		0,03	0,50
S12 Ecole	12/11/2020	47,87	5047,04	0,22	1,39	0,05		6,14	93,51		0,32	1,82
CGE-Tennis	12/11/2020	0,58	165,68	0,13	0,21	0,01		0,01	14,98		0,01	0,59
Ambressac	12/11/2020	2,99	440,50	0,17	0,42	0,02		0,03	15,31		0,17	0,67

A2. 8: Résultats des analyses sur les éléments traces du suivis de l'inversac de 2020-2021 (1/2).

Nom des échantillons	Date	Li	B	Al	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As
µg/L													
Ambressac	03/12/2020	6,89	136,62		0,59	0,27	0,61	3,68	0,04	0,26	0,43	2,74	0,50
Cauvy	03/12/2020	4,04	106,59		0,63	0,32	0,32	1,74	0,04	0,22	0,19	2,21	0,17
F3	03/12/2020	112,69	1809,38		2,26	<LD	33,67	1,89	0,15	4,05	2,54	2,44	0,46
F4 Hôtel	03/12/2020	15,12	139,16		0,50	0,49	0,53	2,66	0,03	13,28	0,13	1,86	0,18
S12 Ecole	03/12/2020	89,06	897,00		2,58	<LD	24,87	0,48	0,13	2,48	3,14	2,32	0,26
DEMT1	04/12/2020	16,94	223,64		0,56	0,30	0,22	0,91	0,02	0,60	0,13	16,78	0,16
F5	04/12/2020	158,25	1137,63		1,62	<LD	37,06	7,67	0,46	3,23	28,24	13,39	0,44
F6	04/12/2020	16,80	213,15		0,52	0,19	0,27	<LD	0,01	0,37	0,15	1,16	0,22
Ambressac	10/12/2020	8,84	169,24		0,62	0,27	0,38		0,03	0,31	0,55	2,49	0,54
Cauvy	10/12/2020	7,86	188,88		0,61	0,27	0,69	0,55	0,03	0,22	0,29	1,58	0,16
S12 Ecole	10/12/2020	152,36	967,64		1,35	<LD	305,95	10440,45	0,31	3,36	0,09	4,19	0,34
Ambressac	15/12/2020	8,98	175,84	4,79	0,65	0,29	0,41		0,03	0,33	0,46	3,09	0,57
Cauvy	15/12/2020	9,44	207,93		0,61	0,29	0,66	0,63	0,03	0,22	0,18	1,86	0,18
F5	15/12/2020	159,59	1270,27		1,66	0,34	33,93	3,93	0,49	3,53	37,98	4,35	0,20
F6	15/12/2020	35,77	680,45		0,56	0,32	0,50	3,66	0,02	0,67	0,27	1,73	0,24
S12 Ecole	15/12/2020	132,76	2393,58		2,23	<LD	24,18	1,67	0,12	4,02	2,43	2,68	0,46
Ambressac	07/01/2021	9,21	172,43	2,27	0,58	0,29	0,39		0,05	0,76	0,35	6,62	0,43
Cauvy	07/01/2021	8,55	241,63		0,56	0,36	1,05	1,07	0,04	0,38	0,16	1,13	0,23
F3	07/01/2021	150,52	1934,19		1,01	<LD	225,90	9398,23	2,72	11,31	0,12	9,33	0,58
F4 Hôtel	07/01/2021	61,88	1208,79		0,67	0,39	0,24	1,83	0,02	2,65	0,23	2,34	0,43
S12 Ecole	07/01/2021	160,06	3059,95		1,94	0,11	25,84	0,83	0,19	3,73	2,23	2,73	0,55
Vise/Lagune	07/01/2021	193,54	4709,85		1,13	0,19	1,39	2,31	0,04	0,43	0,90	1,32	1,04
DEMT1	08/01/2021	87,15	2042,53		0,79	0,29	2,29	5,98	0,02	1,03	0,40	3,66	0,44
F5	08/01/2021	146,93	1168,74		1,40	0,19	29,02	3,03	0,47	2,51	8,29	2,54	0,38
F6	08/01/2021	62,27	1316,97		0,54	0,38	0,36	3,55	0,02	0,91	0,29	1,87	0,26
DEMT3-1	11/01/2021	99,05	1758,48		0,95	1,26	36,59	1634,30	0,55	2,56	0,40	43,59	0,08
DEMT3-2	12/01/2021	117,32	2026,04		1,02	1,43	20,34	1359,59	0,26	1,92	0,19	3,61	0,13
Ambressac	11/02/2021	6,60	157,78		0,59	0,27	0,47	1,28	0,04	0,45	0,60	2,35	0,62
Cauvy	11/02/2021	12,41	285,34		0,56	0,26	1,81	2,05	0,03	0,30	0,14	1,43	0,13
S12 Ecole	11/02/2021	155,34	3384,52		1,74	0,07	16,66	0,76	0,13	3,06	2,13	2,97	0,51
F4 Hôtel	11/02/2021	86,23	1797,16		0,54	0,51	0,84	2,51	0,04	6,19	0,38	2,96	0,30
F6	11/02/2021	75,95	1750,83		0,42	0,24	0,87	1,21	0,01	1,09	0,25	2,17	0,37
F4 Hôtel	29/06/2021	66,94	1710,59		0,59	0,54	0,73	2,35	0,07	5,89	0,30	2,42	0,52
F5	29/06/2021	84,15	1829,30		1,02	0,36	2,97	0,98	0,05	1,19	1,38	2,10	0,31
F6	29/06/2021	74,06	1658,02		0,84	0,27	0,12	1,03	0,02	0,77	0,36	2,07	0,46
F9	29/06/2021	144,32	1131,23		2,17	0,12	32,19	3,73	0,51	3,09	7,10	3,02	0,20
Vise/Lagune	29/06/2021	188,73	4743,26		1,89	0,11	6,89	12,83	0,06	0,63	2,99	2,79	2,04
S12 Ecole	30/06/2021	147,28	1871,81		2,61	1,12	28,69	9,51	0,25	3,91	3,46	5,35	0,39
Cauvy	30/06/2021	17,72	493,94		0,70	0,34	5,24	10,95	0,03	0,45	0,10	1,43	0,10
DEMT4-0	22/09/2021	118,10	72,10		0,06	<LD	31,02	2,28	0,85	4,74	1,00	61,87	0,21
DEMT4-1 T0+4h	15/11/2021	185,71	82,69		0,03	0,06	18,73	5357,18	0,13	0,76	<LD	24,44	0,47
DEMT4-1 T0+24h	16/11/2021	174,97	517,58		0,06	0,05	58,36	7304,69	0,25	1,86	<LD	16,42	0,46
F4 Hôtel	16/11/2021	83,06	1839,22		0,61	1,21	0,72	1,82	0,04	2,77	0,34	2,46	0,54
F5	16/11/2021	154,36	1414,13		2,36	0,18	23,43	2,15	0,39	2,71	3,15	3,55	0,39
F6	16/11/2021	84,65	1967,74		0,71	0,38	0,49	2,99	0,01	0,90	0,35	3,45	0,46
DEMT4-2 T0+4h	17/11/2021	180,71	189,96		0,07	0,05	12,71	3570,89	0,09	0,87	<LD	11,83	0,21
DEMT4-2 T0+24h	18/11/2021	180,34	509,15		0,08	0,08	46,67	3662,20	0,24	2,27	<LD	12,25	0,32
S12 Ecole	24/11/2021	170,71	3400,17		1,89	0,13	13,77	1,57	0,13	2,44	2,03	4,48	0,58

A2. 9: Résultats des analyses sur les éléments traces du suivis de l'inversac de 2020-2021 (2/2).

Nom des échantillons	Date	Rb	Sr	Y	Mo	Cd	Sb	Cs	Ba	Th	Pb	U
µg/L												
Ambressac	03/12/2020	2,93	356,72	0,13	0,36	0,02		0,02	12,50		0,11	0,57
Cauvy	03/12/2020	2,19	232,69	0,10	0,22	0,01		0,02	19,17		0,13	0,63
F3	03/12/2020	49,71	4060,21	0,20	3,43	0,07		2,89	58,40		0,29	1,90
F4 Hôtel	03/12/2020	6,21	609,07	0,06	0,81	0,01		0,35	14,51		0,01	0,83
S12 Ecole	03/12/2020	31,68	2982,44	0,21	1,83	0,05		2,89	56,80		0,18	1,45
DEMT1	04/12/2020	6,52	665,21	0,13	0,72	0,01		0,43	19,50		<LD	0,92
F5	04/12/2020	51,34	4919,81	0,21	1,89	0,30		5,76	93,51		0,52	1,87
F6	04/12/2020	6,85	702,55	0,08	0,62	<LD		0,39	21,49		0,01	0,93
Ambressac	10/12/2020	3,40	429,91	0,14	0,34	0,02		0,03	13,92		0,09	0,61
Cauvy	10/12/2020	2,75	478,83	0,10	0,09	0,03		0,02	48,46		0,06	0,78
S12 Ecole	10/12/2020	37,59	4668,77	0,16	1,12	<LD		1,99	59,09		0,02	1,82
Ambressac	15/12/2020	3,61	468,77	0,15	0,35	0,02		0,03	15,44		0,10	0,63
Cauvy	15/12/2020	3,26	504,00	0,12	0,10	0,03		0,03	55,06		0,01	0,79
F5	15/12/2020	53,27	5031,77	0,18	1,93	0,10		5,79	92,49		0,38	2,00
F6	15/12/2020	16,04	1501,75	0,13	0,95	0,02		0,70	44,95		0,02	1,28
S12 Ecole	15/12/2020	60,42	5113,93	0,17	3,83	0,07		3,11	59,51		0,28	2,17
Ambressac	07/01/2021	3,46	461,61	0,15	0,30	0,02		0,03	15,59		0,10	0,59
Cauvy	07/01/2021	4,16	591,81	0,12	0,34	0,04		0,03	57,54		<LD	0,78
F3	07/01/2021	63,66	5239,81	0,08	2,21	0,01		2,41	51,10		<LD	1,86
F4 Hôtel	07/01/2021	36,72	2936,54	0,19	1,74	0,05		1,62	48,17		0,01	1,53
S12 Ecole	07/01/2021	96,94	6999,95	0,17	5,34	0,09		3,08	52,23		0,30	2,52
Vise/Lagune	07/01/2021	138,08	9025,14	0,03	12,21	0,03		0,31	12,26		0,02	3,39
DEMT1	08/01/2021	58,03	4333,48	0,26	3,68	0,12		0,72	52,84		0,01	2,03
F5	08/01/2021	55,80	4718,43	0,19	1,88	0,05		5,33	79,83		0,19	1,75
F6	08/01/2021	35,90	2935,96	0,16	1,60	0,08		0,99	64,63		0,01	1,56
DEMT3-1	11/01/2021	48,12	3405,31	0,01	11,44	0,01		0,34	37,90		0,02	2,83
DEMT3-2	12/01/2021	51,51	3817,67	0,01	3,65	0,02		0,33	40,35		0,02	3,11
Ambressac	11/02/2021	3,16	365,37	0,12	0,23	0,04		0,03	15,04		0,11	0,58
Cauvy	11/02/2021	5,92	817,42	0,14	0,14	0,05		0,07	76,02		<LD	0,82
S12 Ecole	11/02/2021	98,18	7131,53	0,17	5,81	0,08		2,76	46,91		0,28	2,63
F4 Hôtel	11/02/2021	48,51	3788,47	0,20	2,25	0,06		1,74	52,64		0,01	1,85
F6	11/02/2021	44,08	3475,65	0,19	2,42	0,08		1,09	52,25		0,03	1,86
F4 Hôtel	29/06/2021	45,45	3634,85	0,21	3,55	0,06	0,08	0,93	39,28		0,00	1,82
F5	29/06/2021	53,30	4045,45	0,25	4,10	0,04	0,08	1,57	40,57		0,03	2,05
F6	29/06/2021	45,38	3406,89	0,16	3,18	0,05	0,08	0,71	34,25		0,02	1,76
F9	29/06/2021	53,82	4916,30	0,21	1,68	0,06	0,04	5,33	91,22		0,14	1,80
Vise/Lagune	29/06/2021	132,27	9066,69	0,06	12,01	0,01	0,25	0,39	15,61		0,10	3,33
S12 Ecole	30/06/2021	62,51	5604,77	0,36	3,56	0,12	0,09	4,11	72,93		0,56	2,53
Cauvy	30/06/2021	9,16	1205,76	0,15	0,26	0,07	0,03	0,10	105,08		0,02	1,02
DEMT4-0	22/09/2021	8,92	12590,33	0,02	11,64	<LD	1,22	0,23	210,76		<LD	0,60
DEMT4-1 T0+4h	15/11/2021	10,70	16864,56	0,03	3,60	<LD	0,05	0,36	278,75		0,01	0,05
DEMT4-1 T0+24h	16/11/2021	20,10	14601,21	0,02	8,11	<LD	0,06	0,48	237,48		<LD	0,31
F4 Hôtel	16/11/2021	50,96	3902,94	0,19	2,96	<LD	0,05	1,23	45,58		0,01	1,70
F5	16/11/2021	54,07	4674,69	0,20	2,11	<LD	0,04	4,77	72,64		0,14	1,81
F6	16/11/2021	52,09	3866,25	0,19	3,33	<LD	0,07	0,71	39,44		0,03	1,76
DEMT4-2 T0+4h	17/11/2021	13,01	15860,13	0,03	2,88	<LD	0,03	0,43	268,76		<LD	0,19
DEMT4-2 T0+24h	18/11/2021	19,89	14697,67	0,02	4,60	<LD	0,02	0,51	233,07		0,00	0,44
S12 Ecole	24/11/2021	91,40	7056,90	0,18	6,48	<LD	0,12	2,30	36,18		0,38	2,42

A2. 10: Résultats des analyses sur les terres rares (REE) des campagnes mensuelles de 2020.

Nom des échantillons	Date	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
		*10 ³ µg/L													
Ambressac	22/01/2020	10,70	3,44	2,01	10,40	2,39	0,87	8,84	0,70	5,48	1,10	5,15	0,87	5,88	1,16
Cauvy	22/01/2020	9,56	1,48	1,86	9,02	2,27	1,03	4,16	0,70	4,87	0,85	3,68	0,73	4,39	0,77
S12 Ecole	22/01/2020	88,27	50,22	9,53	43,25	7,85	2,32	10,54	1,72	12,10	2,49	8,23	1,28	7,01	1,25
Vise	22/01/2020	14,37	1,91	2,44	13,13	3,09	0,86	3,81	0,70	5,16	1,03	3,51	0,60	3,76	0,59
F5	22/01/2020	81,13	76,99	12,18	49,15	9,19	2,95	12,91	2,20	15,99	3,06	10,06	1,49	8,19	1,39
F6	22/01/2020	13,93	1,91	2,96	12,83	3,04	1,14	5,05	0,83	5,80	0,99	4,29	0,75	4,92	0,79
F15	26/02/2020	3,97	2,62	0,11	2,03	1,17	0,81	0,27	0,20	0,15	0,18	0,54	0,08	0,12	0,25
Ambressac	26/02/2020	10,47	7,81	2,20	10,99	2,63	0,81	9,04	0,76	5,57	1,39	5,40	0,82	6,50	1,13
Cauvy	26/02/2020	10,15	2,01	2,01	8,80	2,31	0,75	4,06	0,75	4,69	1,08	3,50	0,58	3,77	0,59
S12 Ecole	26/02/2020	78,55	44,66	8,68	43,82	7,96	2,55	11,98	1,90	13,53	2,87	8,92	1,39	7,80	1,39
Vise	26/02/2020	13,37	1,58	2,38	13,06	2,62	0,78	4,00	0,64	5,31	1,29	4,53	0,70	4,53	0,79
F5	26/02/2020	73,70	59,56	12,74	49,33	8,99	2,69	11,82	1,86	13,39	2,73	9,06	1,21	7,69	1,24
F6	26/02/2020	10,80	2,01	2,35	12,00	2,47	0,91	4,56	0,83	6,16	1,51	5,15	0,78	5,15	0,89
CGE-Tennis	03/03/2020	5,88	1,15	1,75	8,59	1,88	0,70	3,95	0,72	4,95	1,32	4,55	0,67	4,32	0,75
DEM-T1.1	27/05/2020	16,07	4,76	3,45	15,48	3,67	1,24	6,19	1,14	7,19	1,84	5,40	1,03	6,16	1,35
F6	27/05/2020	14,48	4,51	2,93	13,43	2,91	0,91	4,39	0,70	4,96	1,13	3,56	0,66	3,99	0,83
DEM-T1.2	28/05/2020	17,81	2,21	3,92	16,59	3,28	1,38	6,54	1,27	8,33	1,82	4,97	0,92	5,59	1,16
CGE-Tennis	28/05/2020	5,10	1,52	1,11	5,61	1,46	0,50	2,83	0,52	3,72	0,81	2,81	0,50	3,42	0,61
DEM-T2.1	02/06/2020	14,80	23,34	3,04	12,91	3,00	0,98	4,14	0,75	4,22	0,80	3,28	0,47	2,36	0,44
DEM-T2.2	02/06/2020	12,79	18,22	2,67	11,95	2,62	0,82	4,04	0,68	3,86	0,66	2,77	0,47	2,41	0,45
F5	04/06/2020	79,85	71,04	10,84	50,59	10,00	3,14	14,01	2,48	16,13	3,66	11,95	1,79	10,99	1,92
F6	04/06/2020	12,74	3,19	2,33	10,98	2,59	0,81	3,72	0,66	4,52	0,93	3,35	0,62	3,97	0,72
Vise	04/06/2020	15,96	1,82	2,79	13,94	2,86	0,92	4,16	0,77	6,11	1,28	4,19	0,68	4,39	0,81
S12 Ecole	04/06/2020	95,44	78,29	11,26	47,59	8,57	2,52	12,18	2,18	14,21	3,21	11,10	1,67	9,89	1,83
Ambressac	04/06/2020	2,37	1,88	0,76	3,94	1,17	0,36	7,19	0,37	2,82	0,64	2,30	0,49	3,84	0,86
Cauvy	04/06/2020	8,81	2,57	1,73	8,68	1,98	0,71	4,40	0,77	6,39	1,35	4,59	0,73	5,17	1,01
F5	07/07/2020	89,18	69,23	13,26	58,53	11,36	3,06	12,45	2,14	16,18	3,11	10,04	1,39	8,81	1,49
F6	07/07/2020	15,09	4,56	3,51	18,84	4,66	1,35	5,77	1,02	7,50	1,49	4,80	0,81	4,83	0,94
Vise	07/07/2020	17,48	3,07	3,48	15,88	3,67	1,09	5,00	0,91	6,83	1,49	5,38	0,85	5,59	0,90
CGE-Tennis	07/07/2020	6,44	1,49	1,48	7,50	2,03	0,82	4,21	0,67	5,49	1,32	4,28	0,66	4,11	0,82
Ambressac	07/07/2020	14,71	2,30	2,77	13,25	3,48	0,90	7,86	0,78	5,89	1,48	5,26	0,77	6,14	1,18
S12 Ecole	07/07/2020	86,23	61,16	11,00	49,03	9,13	2,63	13,09	2,36	15,79	2,82	10,18	1,56	8,86	1,62
Cauvy	07/07/2020	9,96	1,95	1,80	8,21	2,14	0,70	3,69	0,61	4,73	1,08	3,87	0,59	3,49	0,66
Ambressac	03/09/2020	13,64	17,04	2,04	10,48	2,30	0,94	8,73	1,15	6,52	15,30	5,57	0,63	6,63	1,34
Cauvy	03/09/2020	8,26	4,73	1,49	7,15	2,06	0,60	3,64	0,40	3,58	5,29	3,16	0,49	2,65	0,61
CGE-Tennis	03/09/2020	5,74	6,44	1,31	6,17	1,89	0,85	3,71	0,53	4,28	5,91	4,26	0,59	3,62	0,68
F5	03/09/2020	83,62	64,35	13,58	57,76	10,84	3,20	13,63	2,60	16,91	3,48	11,65	1,70	9,90	1,72
F6	03/09/2020	11,77	59,38	2,32	11,16	2,23	1,27	4,59	1,74	5,42	49,60	3,44	1,94	4,65	0,82
S12 Ecole	03/09/2020	89,10	51,16	10,91	44,54	8,42	2,83	12,96	2,25	14,80	2,79	9,70	1,49	8,82	1,66
Vise	03/09/2020	13,14	58,72	3,53	13,93	2,78	1,42	3,60	1,18	4,86	32,58	4,31	1,35	4,76	0,82
F5	08/10/2020	80,20	60,73	12,72	53,03	8,51	2,41	11,97	2,02	13,59	2,47	8,09	1,14	6,40	1,15
Vise	08/10/2020	14,72	2,15	2,60	13,99	2,73	0,95	4,85	0,78	5,61	1,06	4,17	0,67	4,06	0,66
F6	08/10/2020	14,55	3,50	2,48	11,74	2,46	0,70	4,12	0,65	4,85	0,91	3,44	0,57	4,31	0,70
S12 Ecole	08/10/2020	95,26	85,72	12,43	49,34	9,39	2,40	11,65	1,79	13,22	2,61	8,42	1,05	6,69	1,19
CGE-Tennis	08/10/2020	6,39	1,67	1,46	8,50	1,97	0,69	3,83	0,54	4,60	1,18	4,37	0,57	3,79	0,66
Ambressac	08/10/2020	16,50	2,37	2,94	13,38	2,99	0,89	7,75	0,79	5,63	1,35	5,32	0,79	5,14	0,76
Cauvy	08/10/2020	9,36	1,82	1,66	8,70	2,20	0,72	3,59	0,50	3,84	0,95	3,22	0,45	3,01	0,51
F5	05/11/2020	92,93	69,57	12,26	54,69	10,07	3,52	14,11	2,55	15,81	3,19	10,99	1,83	9,90	1,97
F6	05/11/2020	12,46	3,19	1,69	8,49	1,68	0,61	2,77	0,47	3,36	0,80	2,74	0,45	2,55	0,50
Vise	12/11/2020	20,06	3,80	2,69	12,75	2,38	0,71	3,58	0,66	4,59	0,91	3,24	0,58	3,55	0,57
Cauvy	12/11/2020	9,26	1,86	1,73	7,77	1,78	0,55	3,68	0,57	4,02	0,97	3,17	0,51	2,82	0,52
S12 Ecole	12/11/2020	97,37	95,19	14,71	72,30	11,91	2,84	13,77	2,47	15,49	3,12	9,49	1,32	8,40	1,40
CGE-Tennis	12/11/2020	6,54	1,96	1,70	7,29	2,03	0,75	4,41	0,62	5,09	1,45	5,19	0,72	4,57	0,76
Ambressac	12/11/2020	21,22	3,80	3,52	16,68	3,61	1,02	10,83	0,96	9,05	2,20	6,95	1,30	8,24	1,50

A2. 11: Résultats des analyses sur les terres rares (REE) du suivis de l'inversac de 2020-2021.

Nom des échantillons	Date	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
		*10 ³ µg/L													
Ambressac	03/12/2020	21,26	6,01	3,90	17,32	3,71	1,01	9,44	0,92	7,73	1,80	6,44	0,91	6,60	1,25
Cauvy	03/12/2020	24,09	20,39	4,14	17,77	3,96	0,92	5,36	0,78	5,63	1,36	4,94	0,85	4,99	0,75
F3	03/12/2020	74,78	52,85	10,03	40,54	8,32	2,59	11,78	2,19	12,93	2,66	9,02	1,43	8,19	1,58
F4 Hôtel	03/12/2020	3,74			3,42					3,63		2,00		1,71	
S12 Ecole	03/12/2020	62,12	40,60	6,89	40,10	7,20	1,69	8,73	1,42	9,23	1,98	6,33	0,84	5,49	1,14
DEMT1	04/12/2020	15,12	4,86	1,96	10,16	2,19	0,82	5,10	0,79	5,06	1,37	4,29	0,77	4,63	0,81
F5	04/12/2020	92,02	70,45	10,12	44,21	9,41	2,31	12,20	2,25	15,16	2,70	10,53	1,66	9,19	1,62
F6	04/12/2020	13,38	3,42	2,10	9,57	1,96	0,69	3,41	0,54	3,93	1,02	3,61	0,60	3,26	0,57
Ambressac	10/12/2020	22,03	2,99	3,51	17,55	3,33	0,91	8,99	0,91	7,54	1,56	6,19	0,91	7,54	1,25
Cauvy	10/12/2020	15,25	1,99	2,99	18,59	3,64	0,82	4,66	0,72	5,04	1,12	4,96	0,80	5,19	0,75
S12 Ecole	10/12/2020	37,01	30,59	5,68	28,61	4,97	1,29	6,42	1,00	7,53	1,47	4,48	0,68	4,42	0,84
Ambressac	15/12/2020	21,05	2,99	3,55	15,87	3,84	0,91	9,13	0,91	7,97	1,84	7,17	1,10	7,61	1,21
Cauvy	15/12/2020	20,46	3,47	3,79	19,50	4,09	0,97	5,19	0,80	6,13	1,42	4,60	0,87	5,02	0,80
F5	15/12/2020	97,51	77,53	14,24	69,53	13,97	3,78	16,52	2,93	18,81	3,80	12,97	2,20	11,92	2,18
F6	15/12/2020	35,24	10,29	5,02	25,03	4,77	1,10	6,86	1,11	7,10	1,54	4,85	0,93	5,15	0,78
S12 Ecole	15/12/2020	66,84	32,21	7,53	43,40	6,97	1,85	9,10	1,46	10,29	1,94	7,06	0,96	5,82	1,08
Ambressac	07/01/2021	20,44	2,99	3,79	16,71	4,12	0,91	9,25	0,91	7,49	1,67	5,73	1,10	7,38	1,18
Cauvy	07/01/2021	21,63	3,63	3,37	15,81	5,17	1,21	7,01	1,06	6,84	1,43	3,81	0,67	4,17	1,02
F3	07/01/2021	17,55	7,74	0,94	2,86	2,86	1,05	2,42	0,10	2,48	0,97	2,83	0,65	3,10	0,16
F4 Hôtel	07/01/2021	39,68	6,86	4,61	24,79	6,38	1,51	6,56	1,38	9,05	2,16	6,28	0,93	5,25	1,04
S12 Ecole	07/01/2021	80,44	36,43	8,65	42,78	10,60	2,54	13,49	1,75	12,84	2,21	6,59	1,13	7,00	1,20
Vise/Lagune	07/01/2021	2,34	5,41	0,94	5,27	1,26	0,58	3,28	0,71	1,87	0,88	2,67			0,54
DEMT1	08/01/2021	74,48	8,92	7,41	44,82	7,84	1,98	12,92	2,18	14,33	3,33	11,40	1,56	9,79	1,69
F5	08/01/2021	82,81	57,71	8,53	42,30	8,73	1,91	11,44	1,72	11,97	2,85	8,96	1,19	6,76	1,35
F6	08/01/2021	38,32	4,93	4,98	20,28	5,34	1,28	8,14	1,00	7,99	1,78	4,85	1,10	6,67	1,19
DEMT3-1	11/01/2021	2,75	4,02				1,29	2,98		0,42	0,10				0,16
DEMT3-2	12/01/2021	3,25	5,43		1,91		1,04								
Ambressac	11/02/2021	17,24	2,99	2,57	15,40	2,69	0,91	10,36	0,74	7,40	1,34	6,82	1,06	7,29	1,30
Cauvy	11/02/2021	27,06	3,47	4,78	26,56	3,95	1,05	5,19	0,76	5,62	1,51	5,58	0,81	4,77	0,80
S12 Ecole	11/02/2021	72,94	33,42	8,51	40,59	10,34	2,20	11,85	1,58	12,50	2,25	5,73	0,94	6,81	1,08
F4 Hôtel	11/02/2021	41,90	9,17	5,65	27,62	4,70	1,09	5,80	1,04	10,20	2,13	7,40	0,87	6,49	1,07
F6	11/02/2021	46,83	5,85	7,10	27,01	5,98	1,51	6,11	1,23	10,83	2,62	7,77	1,16	7,01	0,98
F4 Hôtel	29/06/2021	35,13	11,86	3,74	24,93	3,68	0,33	8,19	0,91	8,30		3,62	0,97	6,76	0,96
F5	29/06/2021	51,10		6,07	36,53	7,54	1,68	10,45	1,05	10,72		7,88	0,81	7,65	1,45
F6	29/06/2021	46,88		3,20	23,14	2,55	2,20	9,40	1,21	10,94		7,64	1,26	3,62	1,50
F9	29/06/2021	72,60	58,38	7,22	31,43	8,62	3,62	12,02	1,94	12,08		7,48	1,57	7,72	
Vise/Lagune	29/06/2021	4,70				1,24	0,75	2,98		0,92					
S12 Ecole	30/06/2021	119,24	69,40	14,08	50,05	14,67	1,33	20,21	1,72	18,39		9,01	0,91	8,67	0,82
Cauvy	30/06/2021	26,16		3,78	17,78	3,53	1,66	8,68	0,56	4,62		8,25	0,77	7,60	
DEMT4-0	22/09/2021	2,93		0,47	2,44		2,59		0,21	0,63	0,18				
DEMT4-1 T0+4h	15/11/2021	3,52		0,88	1,00		1,71		0,21	0,21	0,09				
DEMT4-1 T0+24h	16/11/2021	3,63		0,39	0,49		1,56		0,11	0,21	0,23				
F4 Hôtel	16/11/2021	42,92	4,69	5,41	16,72		1,51	6,48	1,15	8,99	1,76	8,28	0,63	7,03	1,28
F5	16/11/2021	84,17	40,90	10,02	46,20	5,04	2,23	19,09	1,60	15,88	2,69	7,11	0,75	6,47	0,45
F6	16/11/2021	58,10	8,78	6,86	41,38	6,29	1,90		1,73	9,77	2,44	6,38	0,76	6,91	0,80
DEMT4-2 T0+4h	17/11/2021	2,70		0,38	0,98		2,14		0,05	0,21	0,09				
DEMT4-2 T0+24h	18/11/2021	1,65	2,10	0,29	2,53		2,67		0,05	0,21	0,23				
S12 Ecole	24/11/2021	77,16	27,89	9,14	40,73	6,10	2,74	13,56	1,14	8,93	2,28	7,03	0,67	3,99	0,88

A2. 12: Résultats des analyses isotopiques des campagnes mensuelles de 2020.

Nom des échantillons	Date	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	^3H	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$^{36}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$	$^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$	$\delta^{11}\text{B}$	$\delta^7\text{Li}$	^{222}Rn
		‰	‰	UT	-	*10 ¹⁵ at/at		‰	‰	Bq/L
		± 0,07 ‰	± 0,9 ‰	± 0,5 ‰	± 0,00005 ‰	± 20 ‰	± 10 ‰	± 0,5 ‰	± 0,5 ‰	± 5 ‰
Ambressac	22/01/2020	-5,8	-32,7		0,708766				22,47	1,23
Cauvy	22/01/2020	-6,0	-34,1		0,708709				18,52	6,91
S12 Ecole	22/01/2020	-4,3	-25,4		0,708538			44,60	12,28	22,65
Vise	22/01/2020									2,5
F5	22/01/2020	-4,3	-25,3		0,708538			44,29		1,54
F6	22/01/2020	-5,7	-33,2		0,708526					49,86
F15	26/02/2020	-3,0	-18,5		0,708770			48,12		0,1
Ambressac	26/02/2020	-5,8	-33,5		0,708794					1,53
Cauvy	26/02/2020	-6,0	-33,9		0,708715					7,32
S12 Ecole	26/02/2020	-4,3	-25,2		0,708535			44,42		39,02
Vise	26/02/2020	-5,6	-32,7							NA
F5	26/02/2020	-3,7	-23,7		0,708542			45,08	12,37	2,12
F6	26/02/2020	-5,8	-33,5		0,708531				16,99	42,66
CGE-Tennis	03/03/2020	-6,1	-34,8		0,708607					3,93
DEM-T1.1	27/05/2020	-5,8	-33,6		0,708591			36,74		9,69
F6	27/05/2020	-5,6	-32,8		0,708554					114,55
DEM-T1.2	28/05/2020	-5,8	-33,5	2,1	0,708713	7,72	1,87		17,27	10,9
CGE-Tennis	28/05/2020	-6,1	-34,8		0,708615					3,49
DEM-T2.1	02/06/2020	-5,0	-29,3		0,708630					11,43
DEM-T2.2	02/06/2020	-5,1	-29,7	<0,5	0,708626	2,74	0,66	45,85	12,19	9,82
F5	04/06/2020	-4,3	-25,4		0,708536					2,81
F6	04/06/2020	-5,7	-33,1		?					112,17
Vise	04/06/2020	-5,8	-33,4		0,708538			39,44	18,91	2,64
S12 Ecole	04/06/2020	-4,2	-25,0		0,708534					17,76
Ambressac	04/06/2020	-5,7	-33,1		0,708779					0,25
Cauvy	04/06/2020	-5,9	-34,1		0,708722					7,56
F5	07/07/2020	-4,3	-25,4		0,708540					2,39
F6	07/07/2020	-5,7	-33,1		0,708563					118,18
Vise	07/07/2020	-5,7	-33,1		0,708646					2,79
CGE-Tennis	07/07/2020	-6,1	-34,8		0,708614					4,92
Ambressac	07/07/2020	-5,8	-33,3		0,708610					0,11
S12 Ecole	07/07/2020	-4,3	-25,1		0,708540					35,69
Cauvy	07/07/2020	-6,0	-34,1		0,708726					6,43
Ambressac	03/09/2020	-5,7	-32,5		0,708644					0,16
Cauvy	03/09/2020	-5,9	-33,8		0,708706					5,59
CGE-Tennis	03/09/2020	-6,1	-34,8		0,708614					4,05
F5	03/09/2020	-4,3	-25,6		0,708540					1,72
F6	03/09/2020	-5,7	-32,7		0,708535					92,18
S12 Ecole	03/09/2020	-4,3	-25,5		0,708535					30,35
Vise	03/09/2020	-5,4	-32,1		0,708791					2,14
F5	08/10/2020	-4,4	-25,5		0,708532					2,58
Vise	08/10/2020	-5,4	-31,8		0,708796					2,25
F6	08/10/2020	-5,6	-32,5		0,708551					114,14
S12 Ecole	08/10/2020	-4,3	-25,4		0,708544					25,36
CGE-Tennis	08/10/2020	-6,1	-34,8		0,708615					5,01
Ambressac	08/10/2020	-5,8	-33,2		0,708661					0,31
Cauvy	08/10/2020	-5,9	-34,0		0,708711					6,99
F5	05/11/2020	-4,3	-25,2		0,708596			44,52		1,66
F6	05/11/2020	-5,7	-33,1		0,708548					72,92
Vise	12/11/2020	-4,6	-27,0							1,96
Cauvy	12/11/2020	-5,9	-34,1		0,708737					7,81
S12 Ecole	12/11/2020	-4,3	-25,3		0,708552			44,39		16,04
CGE-Tennis	12/11/2020	-6,1	-34,8		0,708615				18,59	5,66
Ambressac	12/11/2020	-5,8	-33,3		0,708658			33,12		0,37

A2. 13: Résultats des analyses isotopiques du suivis de l'inversac de 2020-2021.

Nom des échantillons	Date	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	^3H	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	^{14}C	$\delta^{13}\text{C}$	$^{36}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$	$^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$	$\delta^{11}\text{B}$	$\delta^7\text{Li}$	^{222}Rn
		‰ ± 0,07 ‰	‰ ± 0,9 ‰	UT ± 0,5 ‰	- ± 0,00005 ‰	pmC ± 0,3 ‰	‰ ± 0,2 ‰	*10 ¹⁵ at/at ± 20 ‰	*10 ¹⁵ at/at ± 10 ‰	‰ ± 0,5 ‰	‰ ± 0,5 ‰	Bq/L ± 5 ‰
Ambressac	03/12/2020	-5,8	-33,4		0,708704							0,45
Cauvy	03/12/2020	-5,8	-33,5		0,708817							8,52
F3	03/12/2020	-4,4	-25,8							44,57		3,2
F4 Hôtel	03/12/2020	-5,7	-32,9		0,708568					40,11		12,42
S12 Ecole	03/12/2020	-4,7	-27,3		0,708691					40,66		21,49
DEMT1	04/12/2020	-5,6	-32,7		0,708655					39,48		26,74
F5	04/12/2020	-4,2	-25,0		0,708554					42,79		3,55
F6	04/12/2020	-5,6	-32,5		0,708677					40,00	17,42	65,65
Ambressac	10/12/2020	-5,8	-33,5		0,708698					33,60		0,5
Cauvy	10/12/2020	-5,6	-32,5		0,708891					40,14		9,13
S12 Ecole	10/12/2020	-3,3	-19,7		0,708921					39,68		21,24
Ambressac	15/12/2020	-5,8	-33,4		0,708697					33,12		0,55
Cauvy	15/12/2020	-5,6	-32,2		0,708915					40,73		8,85
F5	15/12/2020	-4,1	-24,0		0,708605					43,11		3,27
F6	15/12/2020	-5,0	-29,0		0,708900					40,24	23,93	86,07
S12 Ecole	15/12/2020	-2,7	-15,9		0,708971					39,98		22,72
Ambressac	07/01/2021	-5,8	-33,2		0,708693					33,25		0,66
Cauvy	07/01/2021	-5,5	-31,5		0,708958					42,78		8,59
F3	07/01/2021	-2,8	-16,4									19,58
F4 Hôtel	07/01/2021	-3,9	-22,8		0,708972					40,69		32,66
S12 Ecole	07/01/2021	-1,0	-6,3		0,709049					39,98		12,57
Vise/Lagune	07/01/2021	1,2	6,9	0,8 ± 0,6	0,709189					39,29	31,38	0,09
DEMT1	08/01/2021	-2,6	-15,4		0,709107					39,95		10,97
F5	08/01/2021	-4,0	-23,3		0,708607					42,00	13,7	3,94
F6	08/01/2021	-3,8	-22,2		0,709021					41,40	26,96	99,77
DEMT3-1	11/01/2021	-2,8	-16,3	0,8 ± 0,6	0,709043			2,62	0,64	38,73	19,96	4,8
DEMT3-2	12/01/2021	-2,3	-14,6	≤ 0,9	0,709050					38,34	19,81	4,15
Ambressac	11/02/2021	-5,9	-33,5		0,708828							8,23
Cauvy	11/02/2021	-5,5	-31,4		0,708992							0,76
S12 Ecole	11/02/2021	-0,9	-5,6		0,709073							21,15
F4 Hôtel	11/02/2021	-3,5	-20,0		0,709022							8,14
F6	11/02/2021	-3,5	-20,0		0,709059						27,84	74,91
F4 Hôtel	29/06/2021	-3,3	-19,4		0,709091					39,60		17,51
F5	29/06/2021	-3,0	-17,8		0,709042					39,04		10,46
F6	29/06/2021	-3,4	-19,8		0,709076					40,07		80,35
F9	29/06/2021	-4,0	-23,6		0,708602					43,16		2,52
Vise/Lagune	29/06/2021	1,5	8,2		0,709214					38,70		0,02
S12 Ecole	30/06/2021	-2,9	-16,5		0,708823					40,19		10,90
Cauvy	30/06/2021	-5,0	-28,9		0,709049					41,86		7,92
DEMT4-0	22/09/2021	-5,5	-31,9									NA
DEMT4-1 T0+4h	15/11/2021	-6,0	-35,4	≤ 0,9	0,707539	0,478	-1,70	2,65	0,64		19,29	6,82
DEMT4-1 T0+24h	16/11/2021	-5,2	-31,1	≤ 1,0	0,707624	5,698	-5,07	1,55	0,38	37,03	19,3	5,77
F4 Hôtel	16/11/2021	-3,1	-18,0		0,709060					40,13		25,99
F5	16/11/2021	-3,7	-21,7		0,708692					40,49		2,86
F6	16/11/2021	-2,9	-17,1		0,709115					39,09		69,20
DEMT4-2 T0+4h	17/11/2021	-5,8	-34,5	≤ 0,9	0,707553	2,162	-4,55	3,28	0,80	31,48	19,03	6,58
DEMT4-2 T0+24h	18/11/2021	-5,3	-31,5	≤ 1,0	0,707628	5,709	-5,14	2,73	0,65	36,87	19,41	6,74
S12 Ecole	24/11/2021	-0,6	-4,3		0,709101					39,18		13,9

A2. 14: Résultats des analyses en CFC, SF6 et excès d'air (EA) des campagnes mensuelles de 2020. La conversion en pptv prends en compte une altitude moyenne de recharge de 250 m (1/2).

Nom des échantillons	Date	SF6	CFC-12	CFC-11	CFC-113	Temp. recharge imposée	EA	SF6	SF6 corr	CFC-12	CFC-11	CFC-113
		pmol/L				°C	ml/l	pptv				
F5	22/01/2020	0,0004	0,379	0,666	0,080	13	-2,65	1	2	96	45	18
S12 Ecole	22/01/2020 <ld		0,270	0,723	0,095	13	-1,26			68	48	21
F6	22/01/2020	0,0023			0,204	15		8	8			45
Cauvy	22/01/2020	0,0031	2,578	4,843	0,360	15	-0,29	10	5	626	314	78
F5	26/02/2020	0,0008	0,292	0,645	0,100	13	1,03	3	2	74	43	22
S12	26/02/2020	0,0007	0,335	2,746	0,080	13	-3,18	3	5	85	184	18
Cauvy	26/02/2020	0,0020	2,096	4,536	0,282	15	-0,72	6	7	509	294	61
F6	03/03/2020	0,0023	1,942	15,963	0,296	15	3,36	7	5	469	1029	63
CGE	03/03/2020	0,0036	3,006	4,362	0,222	15	4,37	12	7	729	283	48
DEM-T1.1		0,0069	2,056	11,975	0,591	15	3,90	22		504	783	128
	27/05/2020	0,0022	3,225	4,081	0,728	15	3,90	7	5	790	267	158
DEM-T1.2			1,485	9,147	0,793	15	2,34			365	601	173
	28/05/2020	0,0022	2,608	3,477	0,817	15	2,02	7	6	642	229	178
DEM-T2.1			14,961	4,869	0,745	15	4,64			3951	344	175
	02/06/2020	0,0007	26,220	2,747	0,825	15	4,64	2	1	6924	194	194
DEM-T2.2			19,346	3,572	0,812	15	1,49			5080	251	190
	02/06/2020	0,0007	22,512	2,550	1,271	15	3,09	2	2	5911	179	297
F6		0,0030	1,735	13,688	0,386	15	5,42	10		432	911	85
	27/05/2020	0,0032	2,549	4,017		15	5,42	11	6	635	267	
CGE-Tennis		0,0061	2,737	4,376	0,254	15	3,10	20		664	283	55
	28/05/2020	0,0027	3,019	1,892	0,377	15	2,64	9	6	732	123	81
F5			0,089	0,227	0,032	13	-0,10			22	15	7
	04/06/2020 <ld		0,095	0,120		13	-3,57	<ld		24	8	
F6		0,0027	1,867	13,763	0,542	15	5,02	9		462	911	119
	04/06/2020	0,0028	3,572	2,418	0,728	15	5,02	9	5	885	160	160
Vise			10,504	0,124		15	-4,01			689	27	
	04/06/2020	0,0010	1,615	3,854	0,173	15	-4,01	3	8	397	253	38
S12			0,171	0,434	0,076	13	-4,05			43	29	17
	04/06/2020 <ld		0,123	0,629	1,345	13	-4,06	<ld		31	42	297
Cauvy			3,737	3,734	0,398	15	2,17			908	242	86
	04/06/2020	0,0037	5,632	2,707	0,516	15	2,17	12	9	1368	176	111
Ambressac	07/07/2020	0,0033	2,298	4,403	0,324	15	0,71	11	11	563	288	70
CGE-Tennis	07/07/2020	0,0034	3,274	4,901	0,236	15	3,34	11	8	794	317	51
F5	07/07/2020	0,0002 <ld		0,218	0,014	13	0,58	1	1 <ld		15	3
F6	07/07/2020	0,0096	1,988	19,029	0,397	15	5,18	32	22	492	1257	87
S12 Ecole	07/07/2020	0,0005	0,271	0,723	0,073	13	-2,31	2	3	68	48	16
Cauvy	07/07/2020	0,0042	7,349	5,144	0,401	15	3,40	14	9	1785	334	86
Vise	07/07/2020	0,0018	1,800	19,878	0,251	15	-2,99	6	11	444	1309	55
Ambressac	03/09/2020	0,0033	2,314	4,280	0,232	15	2,46	11	11	567	280	50
CGE-Tennis	03/09/2020	0,0032	3,457	4,553	0,212	15	2,82	10	8	839	295	46
F5	03/09/2020	0,0002	0,320	0,269	0,039	13	-2,81	1	1	81	18	9
F6	03/09/2020	0,0041	2,113	19,399	0,221	15	3,15	13	8	523	1283	49
S12 Ecole	03/09/2020 <ld		0,353	0,616	0,041	13	-4,70	<ld		89	41	9
Cauvy	03/09/2020	0,0021	3,861	4,895	0,272	15	1,66	7	5	938	317	59
Vise	03/09/2020	0,1530	1,782	17,504	0,155	15	-4,76	508		444	1165	34
Ambressac	08/10/2020	0,0074	2,497	4,614	0,317	15	-0,44	24	22	611	301	69
CGE-Tennis	08/10/2020	0,0076	3,313	4,686	0,254	15	1,80	25	19	804	303	55

A2. 15: Résultats des analyses en CFC, SF6 et excès d'air (EA) des campagnes mensuelles de 2020. La conversion en pptv prends en compte une altitude moyenne de recharge de 250 m (2/2).

Nom des échantillons	Date	SF6	CFC-12	CFC-11	CFC-113	Temp. recharge imposée	EA	SF6	SF6 corr	CFC-12	CFC-11	CFC-113
		pmol/L		°C	ml/l							
						pptv						
F5	08/10/2020	0,0015	0,321	0,739	0,104	13	-4,14	5	11	81	50	23
F6	08/10/2020	0,0427	2,139	16,885	0,314	15	5,53	143	78	534	1127	70
S12 Ecole	08/10/2020	0,0003	0,353	0,705	0,080	13	-5,17	1	3	90	47	18
Cauvy	08/10/2020	0,0066	3,310	4,969	0,284	15	2,44	21	16	804	322	61
Vise	08/10/2020	0,0025	1,921	18,231	0,177	15	-3,90	8	18	480	1217	39
Ambressac	12/11/2020	0,0079	3,303	5,138	0,462	15	0,39	26	25	808	336	100
CGE-Tennis	12/11/2020	0,0035	2,435	4,081	0,181	15	3,06	11	8	591	264	39
F5	05/11/2020	0,0014	0,149	0,536	0,055	13	-2,77	5	9	38	36	12
F6	05/11/2020	0,0057	1,784	16,471	1,712	15	7,37	19	9	441	1087	375
S12 Ecole	12/11/2020	0,0005	0,158	0,448	0,053	13	-3,73	2	5	40	30	12
Cauvy	12/11/2020	0,0063	2,196	4,486	0,303	15	1,71	20	16	533	291	65

A2. 16: Résultats des analyses en CFC, SF6 et excès d'air (EA) du suivis de l'inversac de 2020-2021. La conversion en pptv prends en compte une altitude moyenne de recharge de 250 m.

Nom des échantillons	Date	SF6	CFC-12	CFC-11	CFC-113	Temp. recharge imposée	EA	SF6	CFC-12	CFC-11	CFC-113
		pmol/L				°C	ml/l	pptv			
Ambressac	03/12/2020	0,3219	2,494	5,313	0,332	15,0	1,75	25	611	348	72
Cauvy	03/12/2020	0,0128	4,108	1,901	0,342	14,9	3,03	29	999	123	74
DEM T1	03/12/2020	0,0182	1,623	18,099	0,243	14,8	4,44	10	399	1188	53
F4	03/12/2020	0,0130	1,693	18,292	0,212	15,0	2,57	21	418	1206	46
F5	04/12/2020	0,0031	0,220	1,148	0,105	13,0	-3,59	11	56	77	23
F6	03/12/2020	0,0015	1,589	17,388	0,243	15,0	2,15	34	395	1156	54
S12 Ecole	03/12/2020	0,1309	1,219	7,758	0,232	13,3	1,98	20	301	509	50
Ambressac	10/12/2020	0,0065	2,013	5,288	0,286	15,0	-1,11	362	494	347	62
S12 Ecole	10/12/2020	0,0018	1,288	6,729	0,183	12,5	0,29	153	332	460	41
Cauvy	10/12/2020	0,0044	3,232	6,906	0,474	14,7	0,47	12	791	451	103
Ambressac	15/12/2020	interaction	2,036	5,279	0,295	15,0	-0,52	514	500	346	64
F5	15/12/2020	0,0031	0,228	0,860	0,048	12,9	-3,18	11	58	58	11
F6	15/12/2020	0,0105	1,812	16,340	0,262	14,3	4,09	47	457	1098	58
S12 Ecole	15/12/2020	0,0112	1,382	6,289	0,193	12,2	0,19	6	367	442	44
Cauvy	15/12/2020	0,0702	3,122	6,763	0,573	14,7	0,94	10	766	443	124
DEMT1	08/01/2021	0,0102	2,063	11,463	0,240	10,3	1,39	29	498	723	49
F4	07/01/2021	0,0045	1,961	12,819	0,224	12,4	1,73	12	484	836	48
F5	08/01/2021	0,0039	0,416	0,693	0,060	12,7	-2,84	14	106	47	13
F6	08/01/2021	0,0075	1,998	12,817	0,300	12,3	3,06	18	495	838	64
S12 Ecole	07/01/2021	0,0098	1,609	3,369	0,141	10,2	-1,09	37	426	234	32
Cauvy	07/01/2021	0,0156	2,978	5,260	0,598	14,3	0,33	49	723	340	128
Vise/lagune	07/01/2021	0,0056	2,422	3,670	0,255	4,9	-2,54	19	548	211	47
DEMT3 -1	11/01/2021	0,0118	0,336	0,573	0,081	10,3	1,09	33	78	35	16
DEMT3 -2	12/01/2021	0,0053	0,097	0,268	0,050	10,5	-0,14	21	23	17	10
DEMT3 -2	12/01/2021	0,0086	0,104	0,199	0,025	10,5		33	25	12	5
Cauvy	11/02/2021	0,0029	2,862	5,246	0,523	14,5	9,05	4	710	347	115
F4	11/02/2021	0,0025	1,858	11,289	0,192	13,3	11,14	3	495	799	45
F6	11/02/2021	0,0034	2,184	12,549	0,201	13,3	13,02	4	580	886	47
F4	29/06/2021	0,0035	2,348	14,418	0,292	18,0	4,23	9	767	1286	87
F5	29/06/2021	0,0015	1,328	11,353	0,135	14,2	2,69	4	373	853	34
F6	29/06/2021	0,0043	0,110	14,384	0,197	17,9	5,79	9	35	1267	58
F9	29/06/2021	0,0000	0,262	0,512	0,038	13,4	-0,21	0	68	36	9
Vise/Etang	29/06/2021	0,0017	0,904	1,612	0,098	24,1	-0,77	12	485	246	51
S12 Ecole	30/06/2021	0,0009	0,675	2,305	0,058	14,7	-2,90	4	198	182	15
Cauvy	30/06/2021	0,0038	2,098	7,219	0,375	16,3	2,76	9	575	533	93
DEMT4-1 T0+4h	15/11/2021	0,0077	0,121	0,115	1,194	13,0	4,36	15	28	7	238
DEMT4-1 T0+24h	16/11/2021	0,0024	0,201	0,119	0,053	13,0	3,37	5	48	8	11
F4	16/11/2021	0,0048	1,396	15,380	0,105	14,2	3,15	12	393	1160	26
F5	16/11/2021	0,0025	0,308	2,002	0,019	13,0	-1,00	9	81	139	4
F6	16/11/2021	0,0036	1,709	16,658	0,089	14,2	6,02	7	485	1264	22
DEMT4-2 T0+4h	17/11/2021	0,0010	0,131	1,056	0,052	13,0	4,48	2	30	65	10
DEMT4-2 T0+24h	18/11/2021	0,0015	0,133	0,132	0,027	13,0	3,81	3	32	8	6
S12 Ecole	24/11/2021	0,0044	1,155	3,997	0,046	13,0	-0,59	19	354	327	13

A2. 17: Résultats des analyses des gaz dissous (He, Ne, Ar, O₂, N₂, CH₄ et CO₂) des campagnes mensuelles de 2020.

Nom des échantillons	Date	He	Ne	Ar	O ₂	N ₂	CH ₄	CO ₂
		mol/l						
		*10 ⁹	*10 ⁹	*10 ⁵	*10 ⁶	*10 ⁴	*10 ⁸	*10 ⁴
F5	22/01/2020	107,16	5,76	0,88	0,31	3,30	143,29	0,53
S12 Ecole	22/01/2020	86,92	6,85	0,93	0,19	3,38		0,54
Ambressac	26/02/2020	4,22	12,15	1,57	126,06	6,81		0,87
Cauvy	26/02/2020	2,77	7,71	1,52	106,67	6,31		0,91
F5	26/02/2020	96,81	8,65	0,90	0,45	3,30	157,96	0,54
F6	26/02/2020	17,61	11,33		182,17	7,23		
S12 Ecole	26/02/2020	6,11	5,35	0,82	45,32	3,18		0,53
CGE-Tennis	03/03/2020	5,44	11,95	1,61	158,72	6,99		0,68
F6	03/03/2020	3,13	11,14	1,56	149,42	6,73		1,14
DEM-T1.1	27/05/2020	8,88	11,49	1,48	105,11	6,54	0,99	0,03
F6	27/05/2020	48,94	12,63	1,83	107,22	7,77		15,90
DEM-T1.2	28/05/2020	14,19	10,17	1,65	90,01	6,56		10,36
CGE-Tennis	28/05/2020	3,55	10,50	1,67	117,34	6,65		7,39
DEM-T2.1	02/06/2020	255,00	11,60	1,69	1,50	7,46	39,27	
DEM-T2.2	02/06/2020	147,20	10,41	1,60	16,87	6,64	28,75	
F5	04/06/2020	162,61	5,04	1,05	6,37	3,93		
F6	04/06/2020	35,18	12,34	1,79	164,94	7,49		12,54
Vise	04/06/2020	7,51	4,94	0,81	152,87	3,05	0,74	0,02
S12 Ecole	04/06/2020	154,32	4,66	1,04	3,09	3,52		
Ambressac	04/06/2020	2,78	8,36	1,36	259,31	5,17	40,12	1,33
Cauvy	04/06/2020	3,13	10,11	1,62	166,55	6,49		9,53
Ambressac	07/07/2020	2,71	8,85	1,40	195,05	5,74	19,36	4,15
CGE-Tennis	07/07/2020	3,43	11,08	1,71	55,09	7,00		8,71
F5	07/07/2020	158,68	8,30	1,18	32,28	5,18	185,91	75,59
F6	07/07/2020	33,38	12,48	1,77	87,43	7,72		15,54
S12 Ecole	07/07/2020	68,75	6,04	0,89	38,76	3,35		45,96
Cauvy	07/07/2020	3,35	11,13	1,67	66,20	6,91		11,87
Vise	07/07/2020	8,40	5,77	1,26	34,09	4,23		12,21
Ambressac	03/09/2020	8,71	10,31		82,11	6,42	100,03	2,46
CGE-Tennis	03/09/2020	3,43	10,65	1,99	1,14	6,98		8,22
F5	03/09/2020	133,90	5,65	1,15	1,34	3,60		64,01
F6	03/09/2020	38,32	10,80	2,13	68,94	7,45		14,75
S12 Ecole	03/09/2020	93,08	4,17	1,20	2,15	3,43		58,57
Cauvy	03/09/2020	4,11	9,68	1,93	30,58	6,41		10,58
Vise	03/09/2020	58,93	4,29	1,50	23,77	3,93		10,23
F5	08/10/2020	30,02	4,60	1,09	1,25	3,66	142,96	
F6	08/10/2020	21,44	12,70	1,95	131,52	7,93		15,34
S12 Ecole	08/10/2020	15,63	3,78	1,01	2,47	2,91	19,09	53,98
CGE-Tennis	08/10/2020	3,88	9,81	1,71	74,40	6,14		7,63
Ambressac	08/10/2020	4,55	7,91	1,49	132,28	5,02	4,97	3,32
Cauvy	08/10/2020	3,78	10,33	1,80	107,83	6,84		10,08
F5	05/11/2020	160,08	5,67	1,16	1,39	4,11	211,23	70,82
F6	05/11/2020	31,74	14,29	1,87	140,23	8,08		14,28
Ambressac	12/11/2020	16,51	8,59	1,55	228,32	5,62		3,50
CGE-Tennis	12/11/2020	3,33	10,86	1,80	132,86	7,06		7,80
S12 Ecole	12/11/2020	137,21	4,91	1,13	9,39	3,72	68,53	66,83
Cauvy	12/11/2020	3,01	9,73	1,72	177,21	6,53		10,02

A2. 18: Résultats des analyses des gaz dissous (He, Ne, Ar, O₂, N₂, CH₄ et CO₂) du suivis de l'inversac de 2020-2021.

Nom des échantillons	Date	He	Ne	Ar	O ₂	N ₂	CH ₄	CO ₂
		mol/l						
		*10 ⁹	*10 ⁹	*10 ⁵	*10 ⁶	*10 ⁴	*10 ⁸	*10 ⁴
Ambressac	03/12/2020	3,50	9,71		253,12	5,84		4,10
Cauvy	03/12/2020	3,69	10,80	1,63	106,59	7,02		9,64
DEM T1	03/12/2020	26,62	11,88	1,70	98,45	7,58		11,08
F4	03/12/2020	31,52	10,35	0,82	123,84	7,31		11,37
F6	03/12/2020	24,93	9,96	1,67	103,93	6,46		10,69
S12 Ecole	03/12/2020	152,41	9,57	1,53	46,94	6,81		1,72
F5	04/12/2020	129,86	5,02	1,02	13,47	3,53		55,01
Ambressac	10/12/2020	2,78	7,34	1,25	9,10	6,03		5,86
S12 Ecole	10/12/2020	66,90	7,90	1,20	5,77	5,77		21,59
Cauvy	10/12/2020	7,08	8,62	1,33	8,18	5,75	traces	11,77
Ambressac	15/12/2020	3,33	7,83	1,27	20,37	5,66		5,56
F5	15/12/2020	135,13	5,30	0,94	9,01	4,10		0,00
F6	15/12/2020	30,09	11,33	1,47	39,45	7,42		11,18
S12 Ecole	15/12/2020	82,75	7,66	1,19	18,63	5,62		17,97
Cauvy	15/12/2020	4,52	8,99	1,39	9,61	6,70		11,85
DEMT3 -1	11/01/2021	47,53	8,68	1,31	9,90	6,73		10,36
DEMT3 -2	12/01/2021	49,17	7,61	1,22	5,90	6,07		11,24
Cauvy	11/02/2021	12,62	15,51	1,71	236,05	8,60		7,25
F4	11/02/2021	41,70	16,19	1,74	232,65	8,97		7,11
F6	11/02/2021	32,19	17,66	1,81	254,59	9,34		6,31
F4	29/06/2021	29,48	10,53	1,58	146,26	6,41		6,47
F5	29/06/2021	58,72	9,58	1,49	110,71	5,98		11,49
F6	29/06/2021	31,44	11,74	1,70	159,27	7,28		7,61
F9	29/06/2021	288,31	7,59	1,46	6,67	6,08		60,80
Vise/Lagune	29/06/2021	4,13	5,73	1,01	87,97	3,39	14,27	0,16
Cauvy	30/06/2021	8,20	10,12	1,55	130,45	6,17	3,97	7,53
S12 Ecole	30/06/2021	148,47	5,27	1,19	7,65	4,25		33,83
DEMT4-1 T0+4h	15/11/2021	206,47	11,90	1,79	1,98	8,07	27,45	6,60
DEMT4-1 T0+24h	16/11/2021	165,69	10,83	1,64	1,00	7,44	24,73	5,35
F4	16/11/2021	31,00	9,91	1,48	113,74	6,21		6,98
F5	16/11/2021	147,25	6,93	1,21	16,66	4,71		52,14
F6	16/11/2021	22,38	12,03	1,59	64,40	7,07		6,60
DEMT4-2 T0+4h	17/11/2021	207,10	11,92	1,90	3,50	8,00	28,62	7,31
DEMT4-2 T0+24h	18/11/2021	186,24	11,19	1,78	2,55	7,54	25,77	6,64
S12 Ecole	24/11/2021	69,42	6,62	1,14	56,62	4,52		8,26

Annexe 3

Compléments des résultats des campagnes mensuelles (2020)

Listes des compléments :

A3.1 : Nouveaux résultats de ^{222}Rn des campagnes spatiales dont les forages DEMENT1 et DEMENT2

A3.2 : Nouveaux résultats en REE des campagnes spatiales dont les forages DEMENT1 et DEMENT2

A3.3 : Estimation des proportions d'eau de mer (en %) calculées avec les concentrations de Cl, Na, K et les isotopes stables de l'eau des échantillons de 2018 à 2020.

A3.4: Evolutions des concentrations en principaux éléments majeurs et des niveaux piézométriques de Ambressac, Cauvy et CGE-Tennis.

A3.5: Evolutions des concentrations en principaux éléments majeurs et des niveaux piézométriques de F5, F6 et S12 Ecole.

A3.6 : Digramme binaire des concentrations en Ca (a), HCO_3 (b), Mg (c et e), SO_4 (d et f) en fonction des concentrations en Cl. Les figurés vides correspondent aux données 2018-2019, les figurés pleins au nouveaux résultats (2020).

A3.7 : Digramme binaire des concentrations en (a) Mg vs Ca, (c) HCO_3 vs Ca et (e) Mg, vs Si ainsi que les zooms sur les points peu chargées (b, d et f). Les figurés vide correspondent aux données spatiales (2018-2019) et les figurés pleins aux campagnes mensuelles avant l'inversac (2020).

A3.8 : Evolution des concentrations et des rapports isotopiques $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ d'Ambressac, Cauvy et CGE Tennis sur la période 2018-2020.

A3.9 : Evolution des concentrations et des rapports isotopiques $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de F5, F6 et S12 sur la période 2018-2020.

A3.10 : Nouveaux résultats en gaz dissous (Ar et Ne)

A3.1 : Nouveaux résultats de ^{222}Rn des campagnes spatiales dont les forages DEMENT1 et DEMENT2

Les données de ^{222}Rn informent sur les interactions eaux roches (cf BRGM/RP-71281-FR). Comme dans les études précédentes, la quasi-totalité des eaux du bassin ont des teneurs en ^{222}Rn inférieures à 10 Bq/L et ont été interprétées comme provenant pour les eaux karstiques de sa production dans les sols, les sédiments résiduels dans les cavités karstiques peu profondes et/ou les (hydr)oxydes de Mn-Fe enrichis en uranium, thorium ou radium dans les fractures (Condomines et al., 2012), et pour les eaux thermales de mélange avec les eaux karstiques.

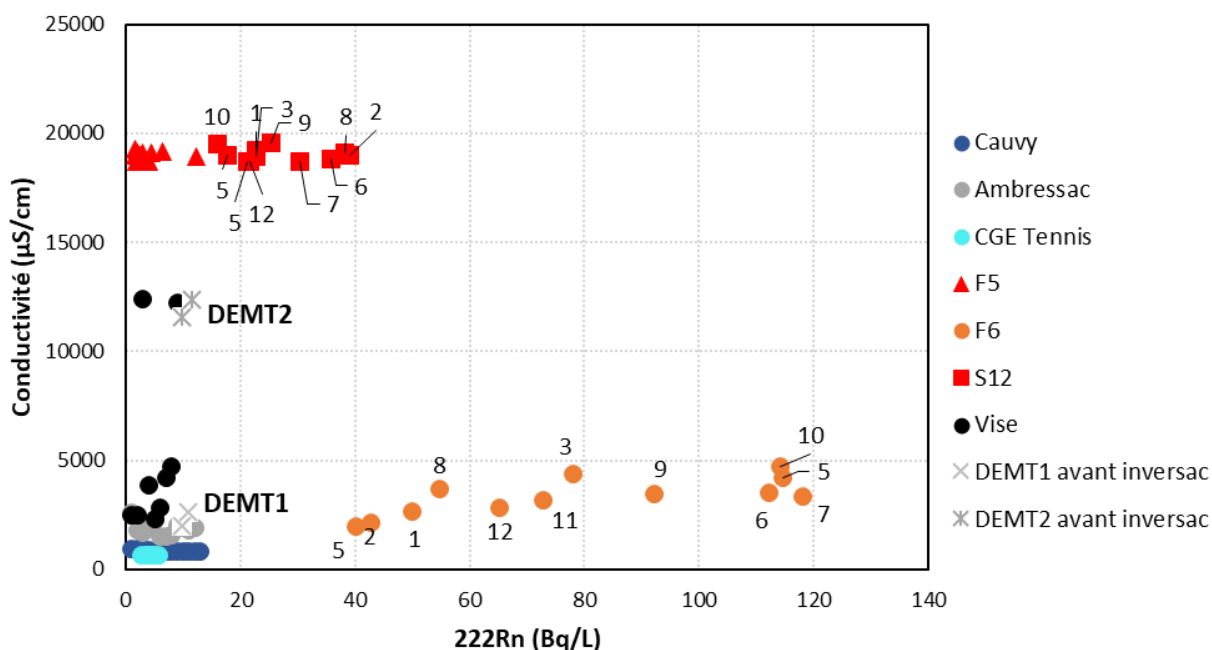


Figure A3.1.1: Conductivité en fonction du ^{222}Rn des eaux du bassin de Thau sur la période 2018-2020. Les étiquettes des données de S12 et F6 correspondent au mois de prélèvement.

Les ouvrages S12 et F6 ont des teneurs plus élevées pouvant atteindre 120 Bq/L. Il a été proposé que ces hautes valeurs s'expliquent par des interactions eau-roche spécifiques, liées aux échanges avec les minéraux argileux du Miocène et en particulier au niveau de l'interface Jurassique-Miocène. La relation avec les niveaux piézométriques n'est pas clairement établie.

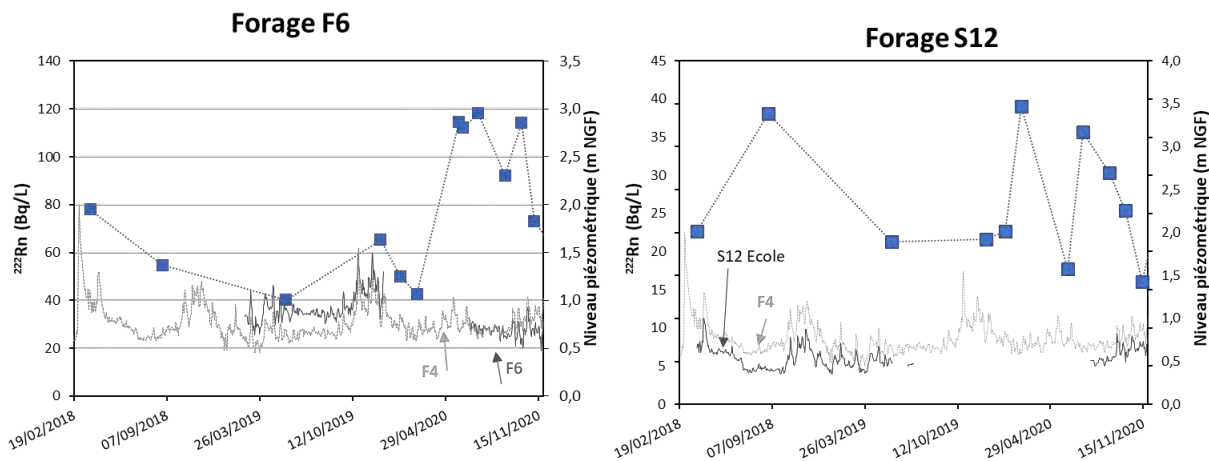


Figure A3.1.1: Evolutions des teneurs en ^{222}Rn des forages F6 et S12 sur la période 2018-2020.

Les teneurs en ^{222}Rn des eaux de la Vise, et des forages DEMENT1 et DEMENT2 sont faibles (inférieurs à 12 Bq/L), du même ordre que les eaux karstiques. Ainsi, comme ces dernières, le radon mesuré dans les échantillons de la vise, DEMENT1 et DEMENT2 provient de sa production dans les sols, les sédiments résiduels dans les cavités karstiques peu profondes et/ou les (hydr)oxydes de Mn-Fe enrichis en uranium, thorium ou radium dans les fractures (Condomines et al., 2012). La source de radon mesurée dans les F6 et S12 provient donc d'une lithologie différente de celle traversée par les eaux du DEMENT2. Cela conforte l'hypothèse que l'horizon producteur se trouve à l'interface entre les sédiments argileux du Miocène et le Jurassique, sous-jacent de la zone de production de DEMENT2

A3.2 : Nouveaux résultats en REE des campagnes spatiales dont les forages DENT1 et DENT2

Les teneurs en REE normalisé au NASC (voir le rapport BRGM/RP-71281-FR pour plus d'informations) des campagnes mensuelles de 2020 sont représentés sur la Figure A.3.2.1 comparées aux teneurs de l'eau de mer et de la lagune (données Aquilina et al., 2002). Les signatures des différentes types d'eau sont les mêmes que précédemment, interprétés dans le rapport BRGM/RP-71281-FR. Les eaux de mer ont des ratios REE/NASC généralement les plus faibles à l'opposé des eaux thermales. Les eaux karstiques ont des teneurs intermédiaires à ces deux types d'eaux. Généralement, les variations temporelles sont faibles. Seul F6 et Ambressac ont des variations significatives, correspondant, comme préciser précédemment, par des variations des proportions de mélanges entre les eaux karstiques récentes et les eaux thermales. Ceci est particulièrement visible pour Ambressac, qui en juin, à le profil le plus proches des eaux de mer, correspondant à la période où la proportion d'eau marine est la plus importante (Figure 7). Enfin, les ratios REE/NASC d'Ambressac mettent en évidence une anomalie en gadolinium, pouvant traduire une pollution des effluents d'eaux usées.

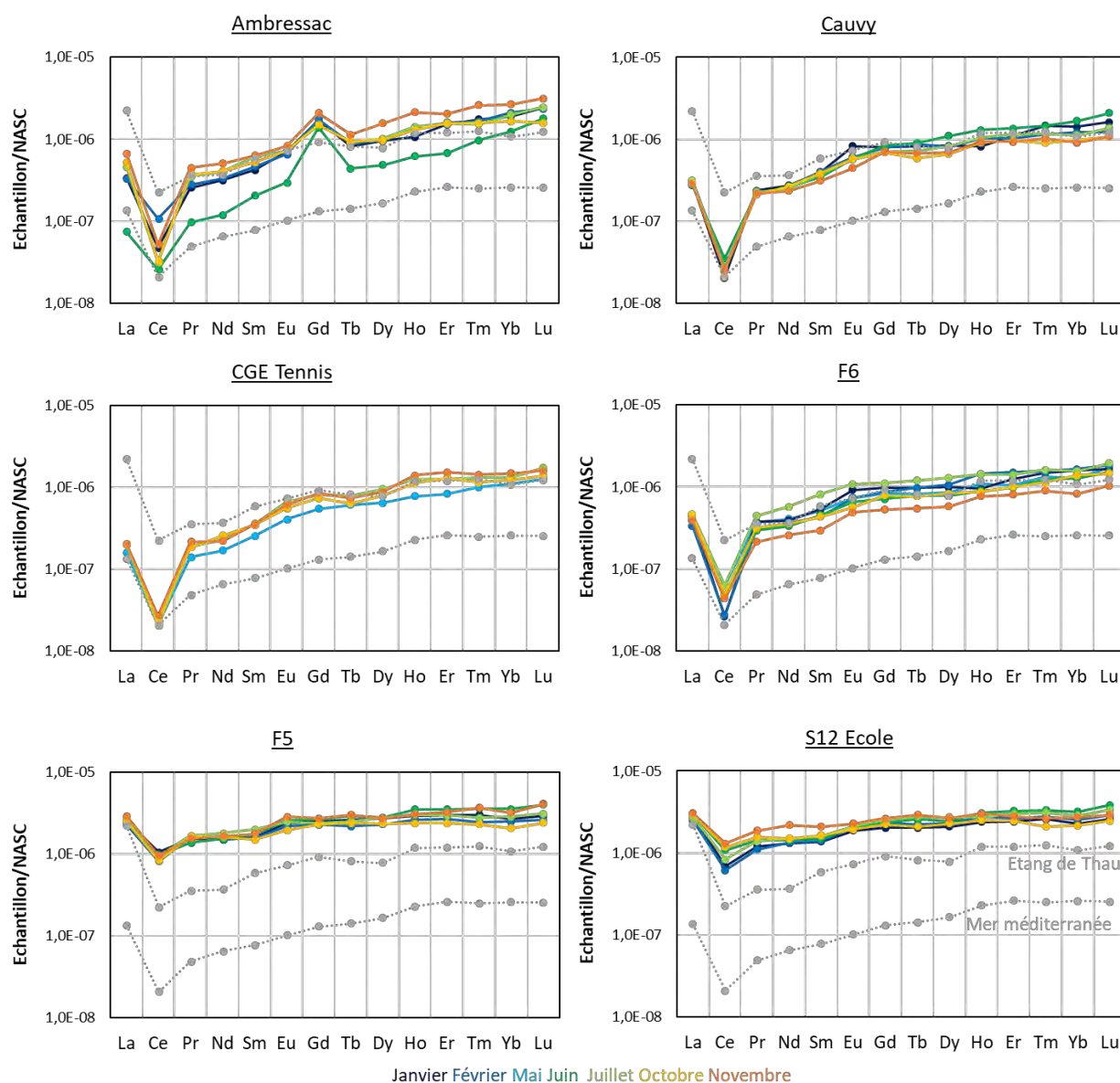


Figure A.3.2.1: Profils des terres rares (normalisés avec le NASC) des eaux échantillonnées lors des campagnes mensuelles.

Les campagnes mensuelles des eaux de la Vise ne mettent pas en évidence de viabilité temporelle des ratios $REE_{\text{échantillon}}/\text{NASC}$ (Figure A.3.2.2). Les éléments majeurs ont mis en évidence l'impact important du mélange des eaux de la Vise avec les eaux de la lagune (cf partie 2.1.4 et 5.1.1). Cette influence n'affecte toutefois pas les REE.

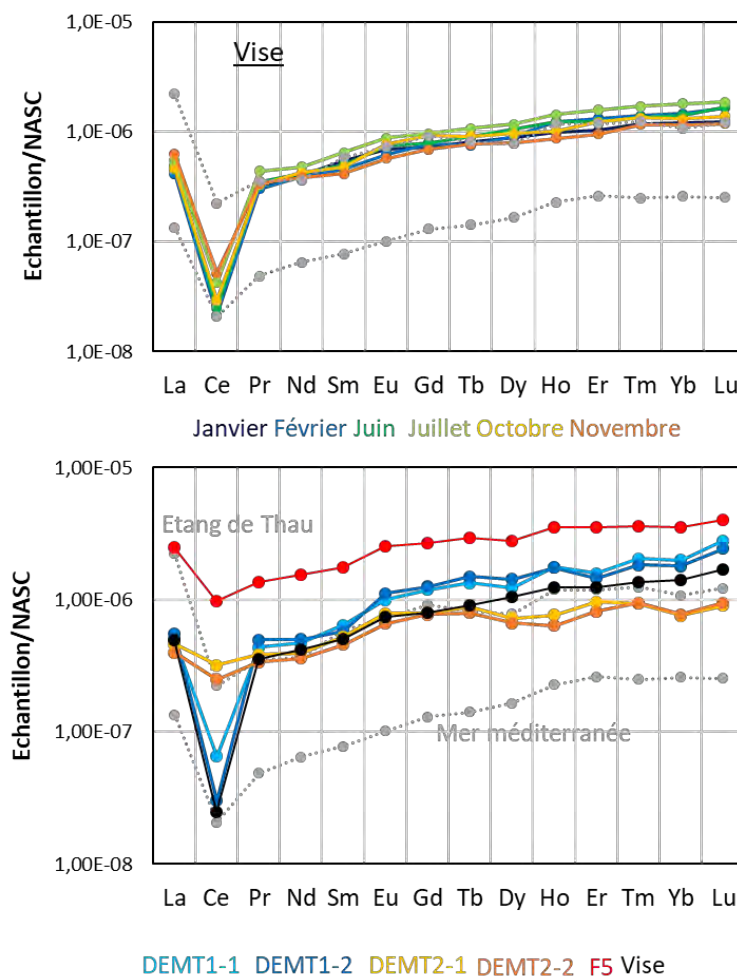


Figure A.3.2.2: Profils des terres rares (normalisés avec le NASC) des eaux de la Vise (campagnes mensuelles) et des eaux de DENT1 et DENT2 comparées aux eaux de la Vise et de F5 de la même période (juin-juillet 2020).

DEMT1 a des profils $REE_{\text{échantillon}}/\text{NASC}$ très similaires aux eaux de la Vise, confirmant les interprétations précédentes indiquant qu'il s'agit du même type d'eau (mélange entre les eaux karstiques et les eaux thermales).

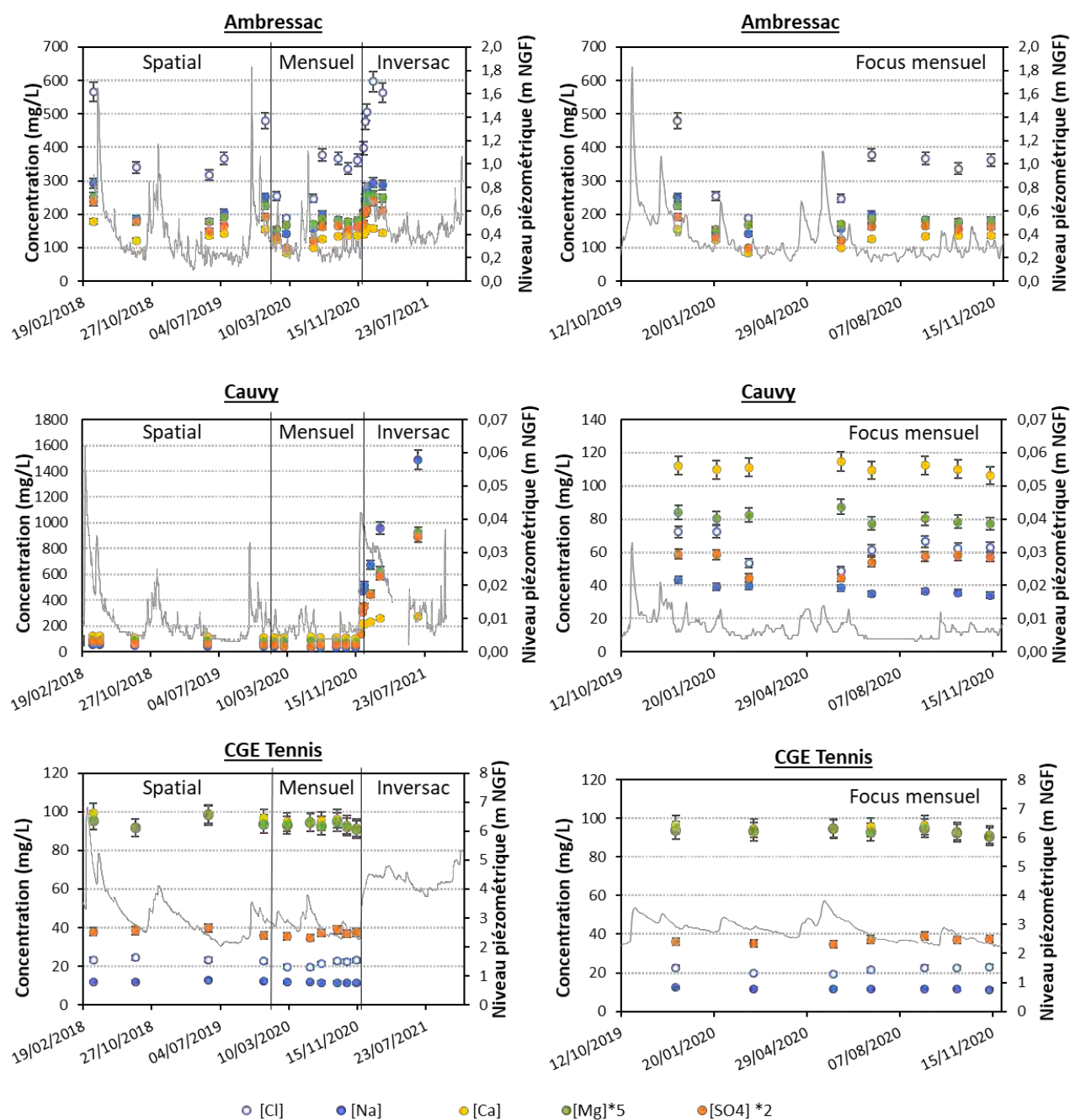
DEMT2 a quant à lui des profils intermédiaires entre les eaux karstiques et les eaux thermales.

Les pompages important (24h) n'affectent que très peu les profils $REE_{\text{échantillon}}/\text{NASC}$

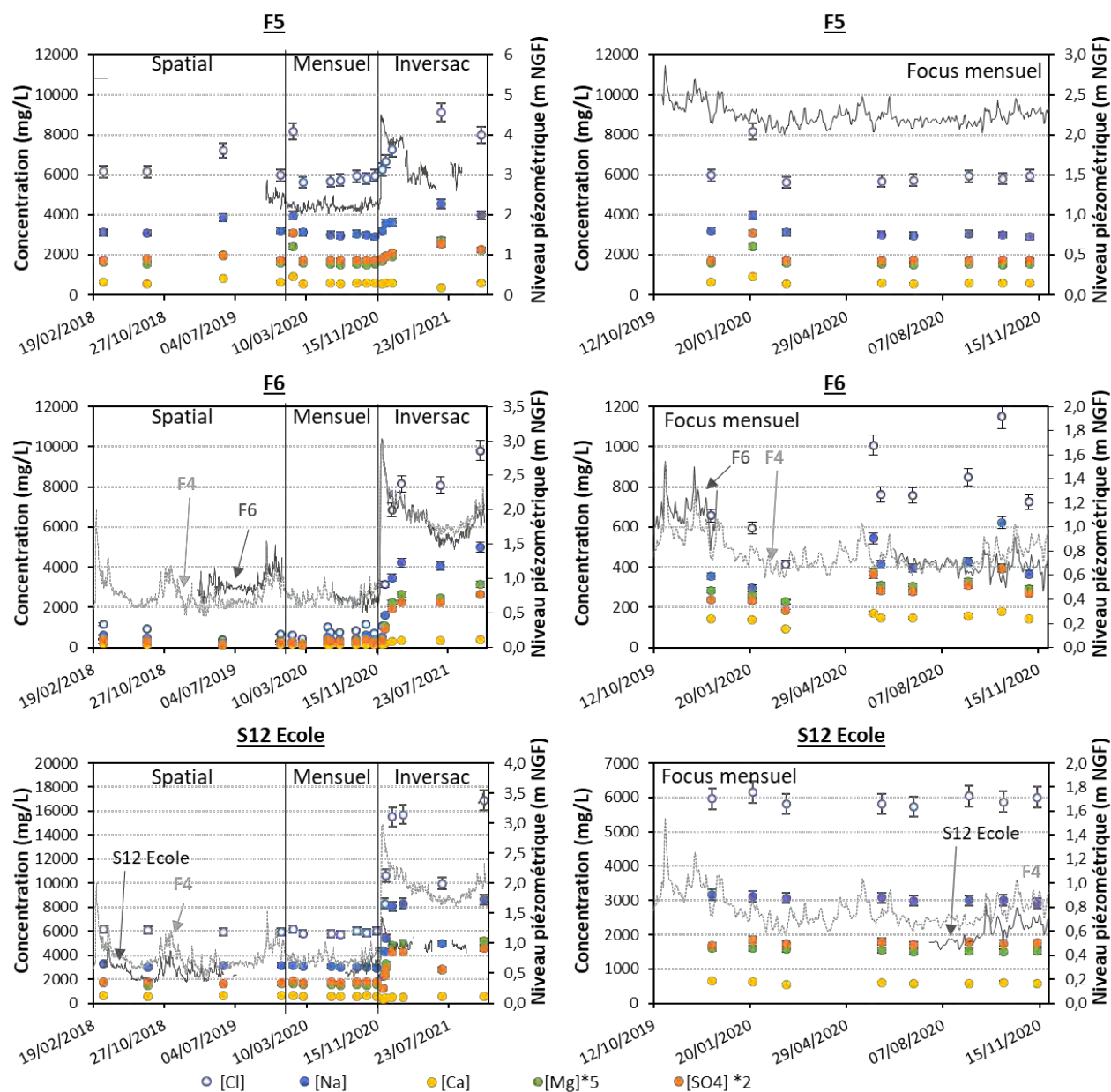
A3.3 : Estimation des proportions d'eau de mer en % (prélèvement du 01/06/2012 au port du Barcarès, Petelet et al., 2016) calculées avec les concentrations de Cl, Na, K et les isotopes stables de l'eau des échantillons de 2018 à 2020.

			Proportion d'eau de mer (%)			
			min	max	moyenne	NB de campagnes
Ambressac	2018-2019	Cl, Na, K	1,4%	2,6%	1,9%	5
		Isotopes stables	5,6%	5,6%	3,1%	5
	2020	Cl, Na, K	0,8%	1,9%	1,5%	7
		Isotopes stables	3,6%	5,9%	4,7%	7
Cauvy	2018-2019	Cl, Na, K	0,3%	0,6%	0,4%	6
		Isotopes stables	0,2%	2,2%	1,4%	6
	2020	Cl, Na, K	0,2%	0,4%	0,3%	7
		Isotopes stables	2,1%	2,9%	2,4%	7
CGE Tennis	2018-2019	Cl, Na, K	0,1%	0,2%	0,1%	4
		Isotopes stables	0,2%	0,8%	0,4%	4
	2020	Cl, Na, K	0,1%	0,1%	0,1%	6
		Isotopes stables	0,3%	0,9%	0,5%	6
F6	2018-2019	Cl, Na, K	1,7%	5,3%	3,5%	4
		Isotopes stables	1,1%	6,9%	4,0%	4
	2020	Cl, Na, K	1,9%	5,4%	3,5%	8
		Isotopes stables	3,6%	7,5%	5,5%	8
Vise (non influencé par la lagune)	2018-2019	Cl, Na, K	2,4%	2,7%	2,6%	2
		Isotopes stables	2,8%	7,0%	5,0%	2
	2020	Cl, Na, K	2,0%	3,1%	2,5%	3
		Isotopes stables	3,7%	6,2%	4,9%	3
F5	2018-2019	Cl, Na, K	22,2%	33,6%	27,7%	4
		Isotopes stables	21,3%	28,8%	24,6%	4
	2020	Cl, Na, K	23,4%	38,2%	26,9%	7
		Isotopes stables	22,5%	33,9%	25,0%	7
S12 Ecole	2018-2019	Cl, Na, K	21,7%	28,7%	26,2%	4
		Isotopes stables	20,5%	26,2%	23,4%	4
	2020	Cl, Na, K	23,0%	29,6%	26,2%	7
		Isotopes stables	22,8%	27,0%	24,5%	7

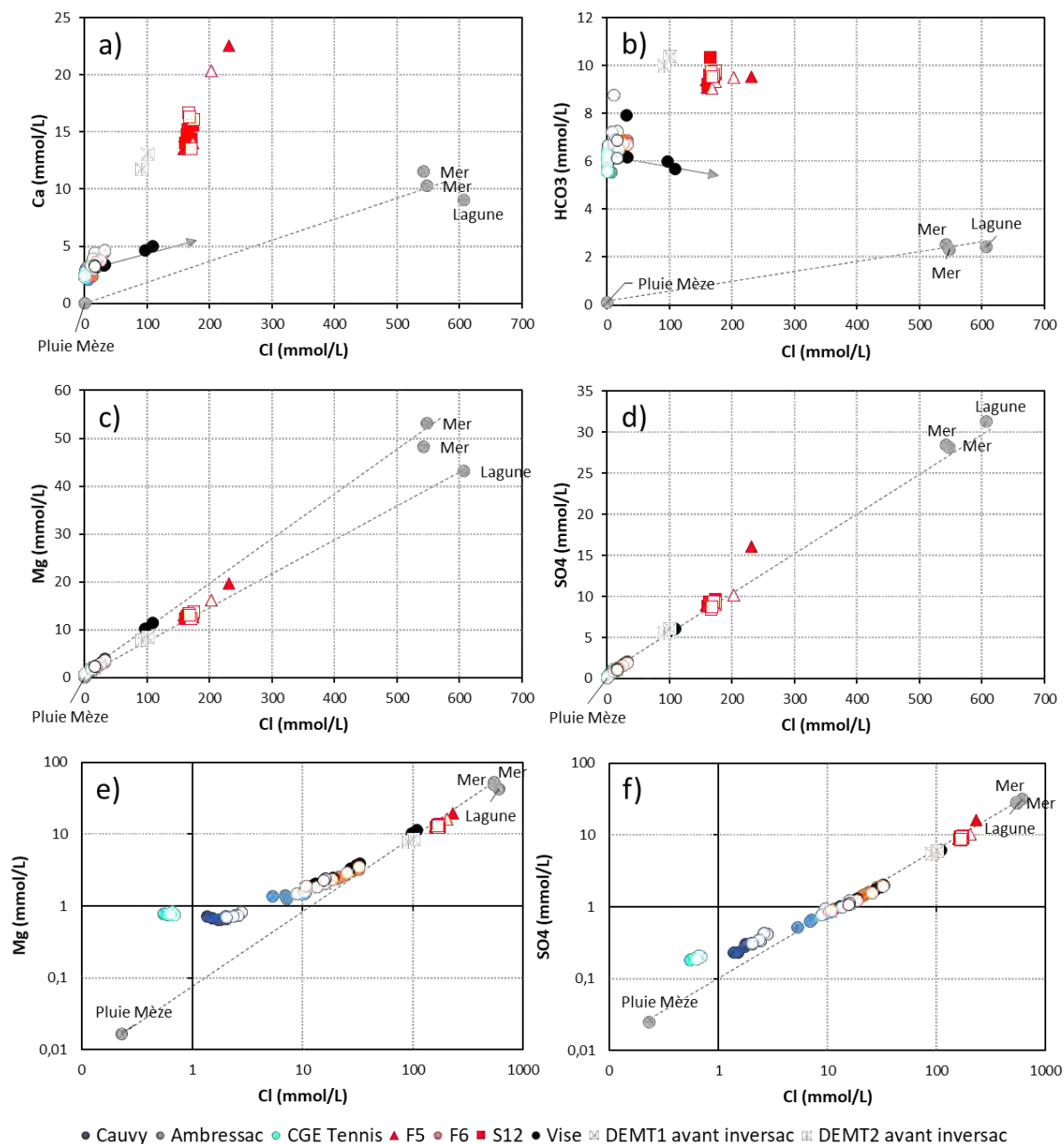
A3.4: Evolutions des concentrations en principaux éléments majeurs et des niveaux piézométriques de Ambressac, Cauvy et CGE-Tennis. L'erreur de mesure sur les éléments majeurs est de 5%.



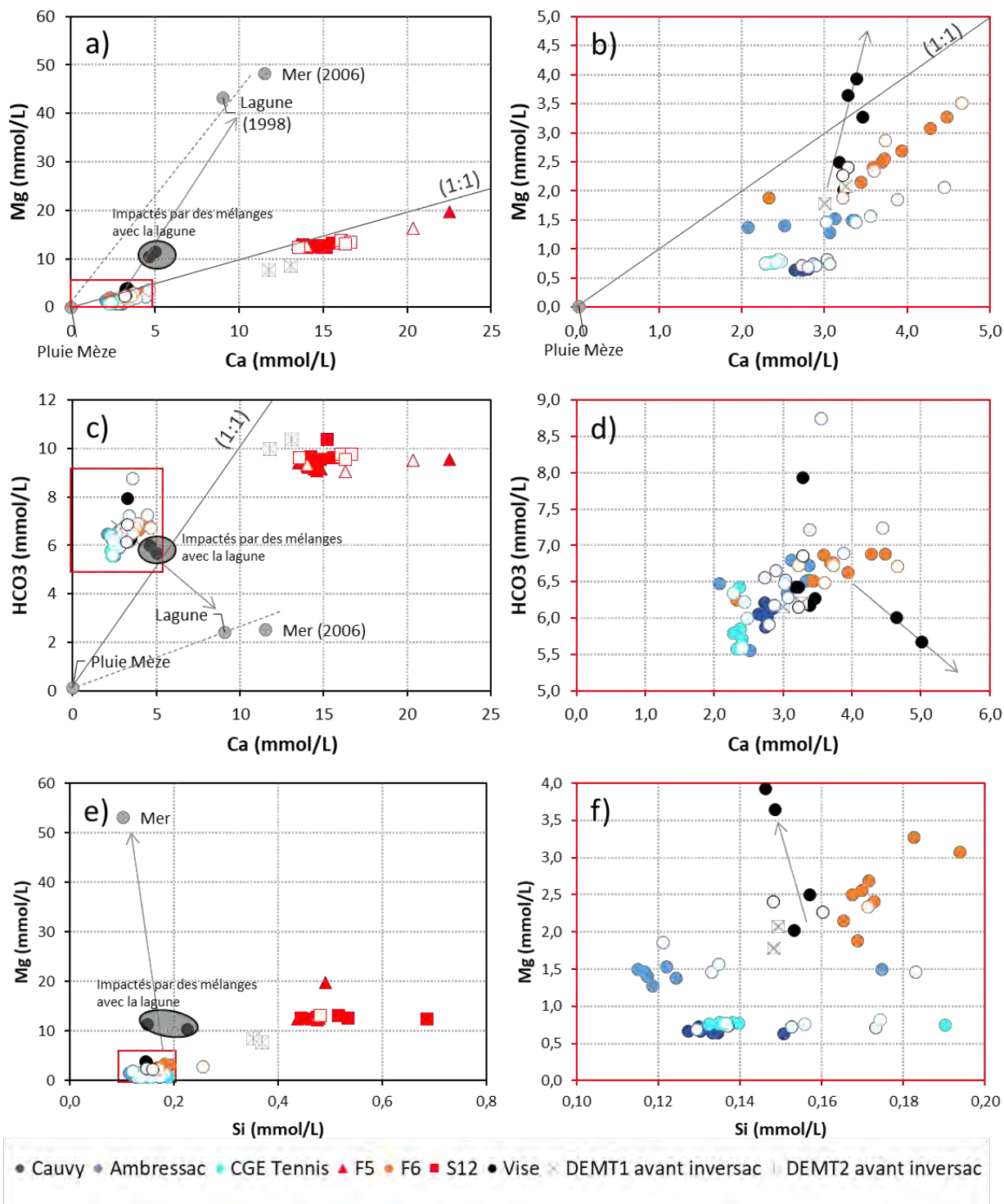
A3.5 : : Evolutions des concentrations en principaux éléments majeurs et des niveaux piézométriques de F5, F6 et S12 Ecole. L'erreur de mesure sur les éléments majeurs est de 5%.



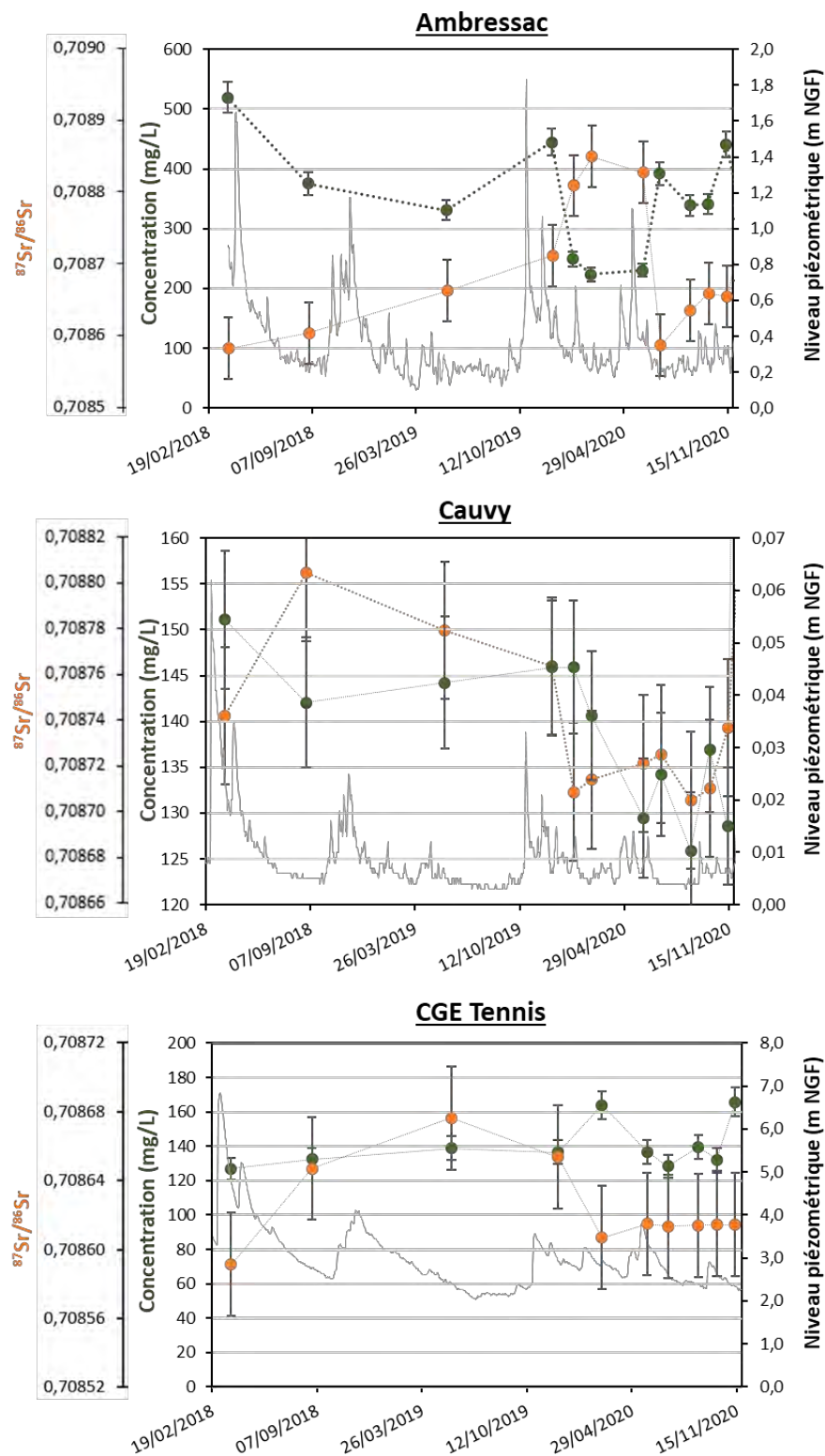
A3.6 : Diagramme binaire des concentrations en Ca (a), HCO₃ (b), Mg (c et e), SO₄ (d et f) en fonction des concentrations en Cl. Les figurés vides correspondent aux données 2018-2019, les figurés pleins aux nouveaux résultats (2020).



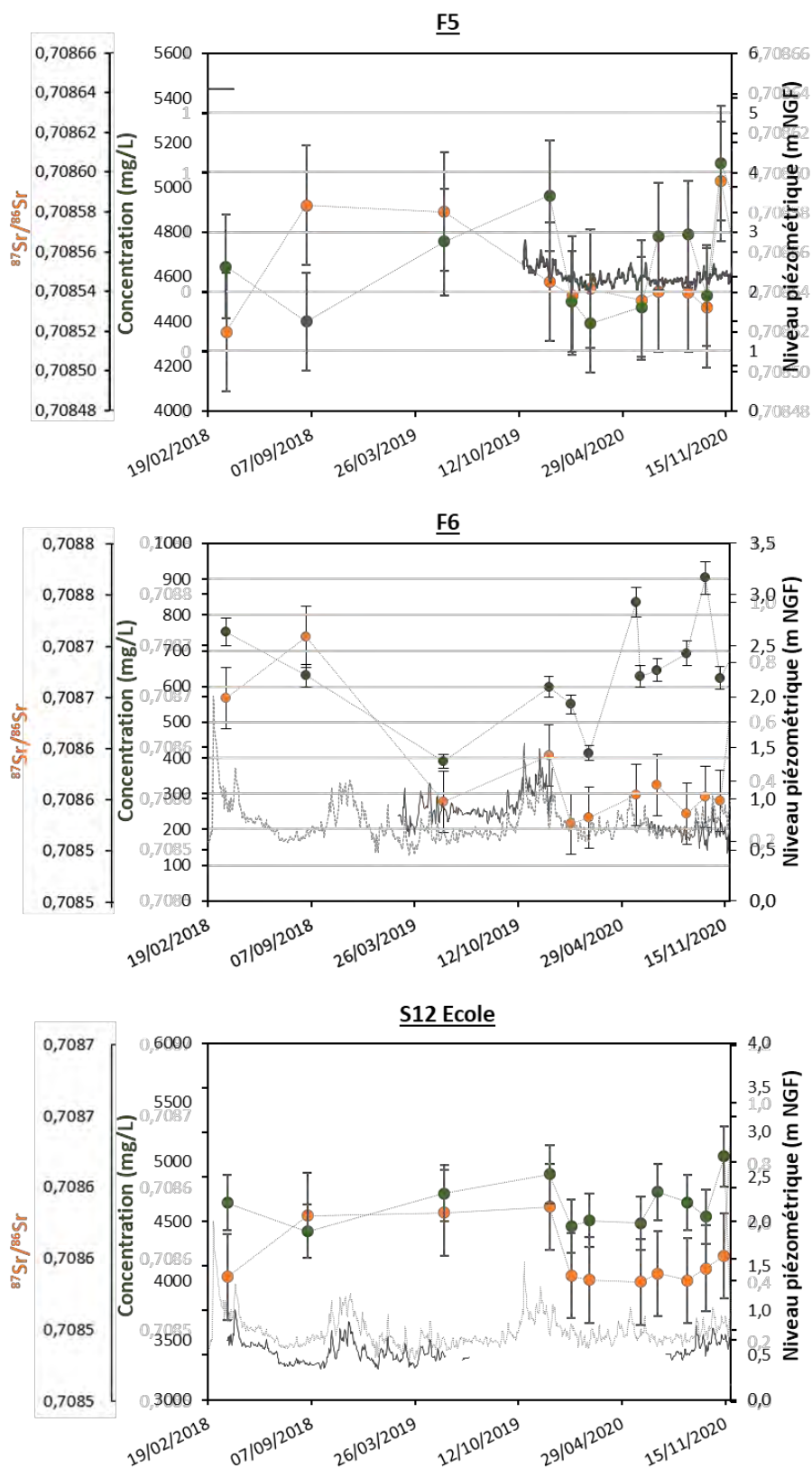
A3.7 : Diagramme binaire des concentrations en (a) Mg vs Ca, (c) HCO₃ vs Ca et (e) Mg, vs Si ainsi que les zooms sur les points peu chargés (b, d et f). Les figurés vide correspondent aux données spatiales (2018-2021) et les figurés pleins aux campagnes mensuelles avant l'inversac (2020).



A3.8 : Evolution des concentrations et des rapports isotopiques $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ d'Ambressac, Cauvy et CGE Tennis sur la période 2018-2020.



A3.9 : Evolution des concentrations et des rapports isotopiques $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de F5, F6 et S12 sur la période 2018-2020.



A3.10 : Nouveaux résultats en gaz dissous (Ar et Ne)

Les données mensuelles (2020) des concentrations en Ar et Ne des eaux étudiées sont reportées sur l'abaque de Heaton and Vogel (1981) afin d'estimer les températures de recharge et l'excès d'air (EA) des eaux. Dans le cas du système de Thau, l'utilisation additionnelle de l'azote pour mieux contraindre ces paramètres n'a pas donné de résultats concluants compte tenu de modification des teneurs en N_2 par des processus de dégradation de nitrates.

Les eaux thermales et les eaux de la Vise ont des valeurs d'EA inférieures à 0 ml/L et des températures de recharge calculées par les gaz hautes, supérieures aux températures théoriques de recharge. Le décalage entre les valeurs théoriques et les valeurs mesurées de ces eaux peut s'expliquer par l'impact de la présence de CO_2 dans ces eaux thermo gazeuses. En effet, lors d'apport de CO_2 dans les eaux (dans notre cas d'origine profonde mantélique), les gaz dissous dans l'eau s'équilibrent avec cette phase gazeuse entraînant un dégazage des gaz dissous dans l'eau et donc une diminution de leur concentration et à l'inverse une dissolution de la phase gazeuse en excès (ici le CO_2). Ce processus est également responsable des valeurs nulles ou négatives d'EA observées sur les forages thermaux. L'Ar et le Ne ne permettent pas ici d'estimer les températures et l'EA associées aux échantillons. Il indique toutefois, dans le cas de la Vise par exemple, l'apport d'eau thermique dans les échantillons.

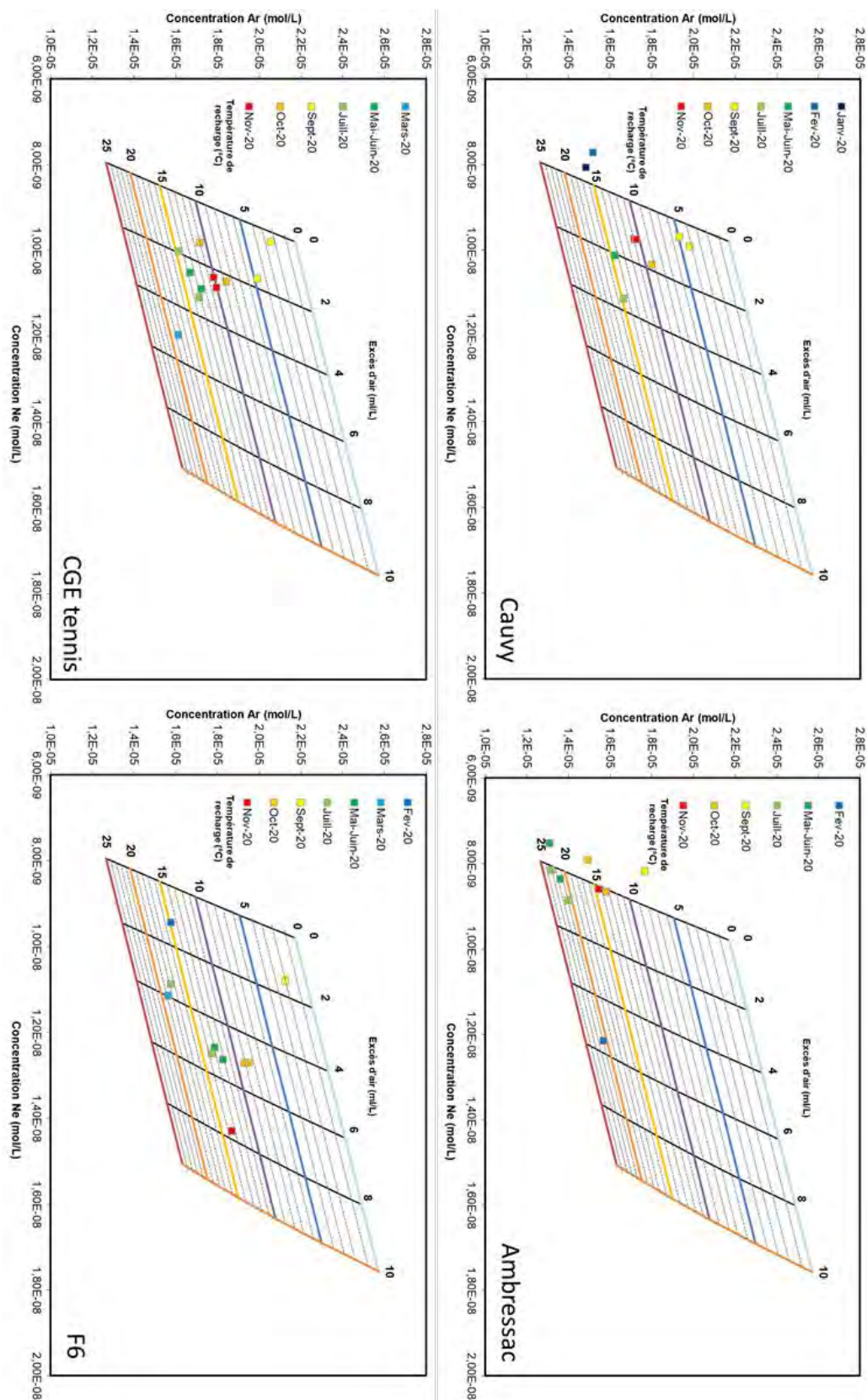


Figure A3.10.1 : Concentration en Ar et Ne des eaux étudiées sur la période 2020 reportés sur la grille de Heaton and Vogel (1981).

Les résultats des températures et EA des eaux karstiques (Cauvy, Ambressac et CGE) ainsi que du forage F6 sont remportés dans le Tableau A3.10 ci-après :

Tableau A3.10 : Estimations graphiques des températures et EA des eaux étudiées.

	Cauvy		Ambressac		F6		CGE	
	T (°C)	EA (ml/L)	T (°C)	EA (ml/L)	T (°C)	EA (ml/L)	T (°C)	EA (ml/L)
Janvier	(16)	neg.	-	-	-	-	-	-
Février	(15)	neg.	20	5,5	15	1	-	-
Mars	-	-	-	-	19	4	18,5	5
Mai-Juin	14,5	2	(22)	neg.	13	5	14	3
Juillet	15	3,5	22	<1	bp mesure		14	2,5
Septembre	4	0,7	(7)	neg.	2	1,5	4	1
Octobre	9	1,9	(15)	neg.	9	5	10	2
Novembre	11	1,2	14,5	0	13,5	7,5	10	2

Les sources d'Ambressac et de Cauvy présente des températures de recharge très variables et élevées et des EA parfois négatifs. Ces résultats mettent en évidence l'influence de dégazage par l'apport de CO₂ et donc une contribution d'eau thermique. Nous savons que les eaux de F6 sont elles aussi des mélanges avec les eaux thermales. Il est donc difficile pour ces trois ouvrages d'interpréter les résultats d'EA et de température puisqu'ils sont impactés par du dégazage et ne correspondent donc pas aux réelles valeurs.

DEMT1 a des températures de recharge estimées par les gaz dissous de 24°C après 4h de pompage puis plus froide (autour de 15°C) après 24h de pompage, proche des températures d'eau mesurée en F6 à la même période. Ceci est cohérent avec les interprétations précédentes, indiquant qu'en début du pompage les eaux de DEMT1 sont plus fortement impactées par des eaux karstiques dont la recharge a eu lieu pendant une période chaude. Par la suite, après 24h de pompage, les eaux seraient plus représentatives des eaux stockées dans l'aquifère, et dont les températures de recharges sont proches de la températures moyennes de recharges du secteur.

DEMT2 a des températures de recharge estimé par la méthode Ar-Ne de 15°C. Cette valeur est cohérente avec la température moyenne annuelle mesurée à la source de la Vène ($T_{\text{moyenne}} = 15,8 \text{ °C}$; variation entre 15,4 et 16,0 °C), représentative de la température dans la zone de recharge du système. Toutefois, les eaux de DEMT2 étant un mélange avec des eaux thermales, il est très probable que les concentrations en Ar et Ne soit impacté par du dégazage et ne sois donc pas représentatif. Les EA sont très variables entre deux duplicatas, il est donc difficile de valider les résultats.

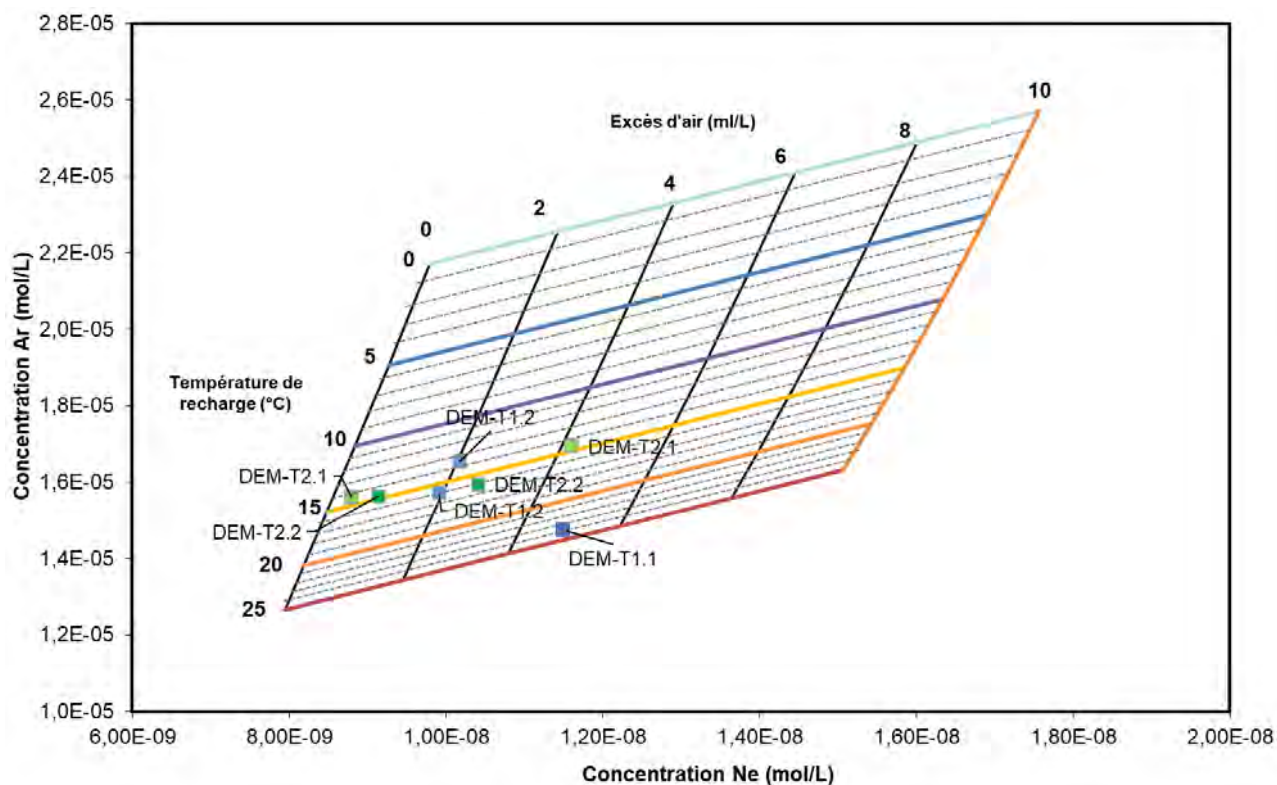


Figure A3.10.2: Concentration en Ar et Ne des forages DEMENT1 et DEMENT2 reportés sur la grille de Heaton and Vogel (1981).

Annexe 4

Compléments des résultats de l'inversac (2020-2021)

A4.1 : Nouveaux résultats de ^{222}Rn en périodes d'inversac dont les forages DEMENT1 et DEMENT2

A4.2 : Nouveaux résultats en REE en périodes d'inversac dont les forages DEMENT1 et DEMENT2

A4.3 : Données de la conductivité en fonction du pH (a et b) et de la température (c et d) des eaux étudiées (2018-2021). Les figurés vides correspondent aux campagnes spatiales et mensuelles i.e. en conditions normales (2018-2020) et les figurés pleins aux campagnes liées à l'inversac (2020-2021). Les droites représentent les évolutions des différents points de prélèvement entre les conditions normales et durant l'inversac.

A4.4 : Représentation graphique des résultats de CFC-113 vs CFC-12 (a) et CFC-11 vs CFC-113 (b) en pptv des eaux étudiées entre 2018 et 2021. Les figurés vides correspondent aux données avant inversac (2018-2020) et les figurés pleins aux campagnes en période d'inversac (2020-2021).

A4.5 : Représentation graphique des résultats de CFC-113 vs CFC-12 (a) et CFC-11 vs CFC-113 (b) en pptv des forages de la plateforme expérimentale.

A4.1 : Nouveaux résultats de ^{222}Rn en périodes d'inversac dont les forages DEMENT1 et DEMENT2

Dans cette étude, les teneurs en ^{222}Rn informent sur les interactions eau/roches. Les nouveaux résultats obtenus en période d'inversac sont illustrés en Figure A4.1. Les gammes de concentrations des différents ouvrages sont sensiblement les mêmes avant et pendant l'inversac. Ainsi, comme précédemment, les teneurs faibles (inférieures à 10 Bq/L) proviendraient de la production naturelle de radon dans les sols, les sédiments résiduels dans les cavités karstiques peu profondes et/ou les (hydr)oxydes de Mn-Fe enrichis en uranium, thorium ou radium dans les fractures (Condomines et al., 2012). Les plus fortes concentrations en radon s'expliquent par des échanges spécifiques des minéraux argileux du Miocène au niveau de l'interface Jurassique-Miocène. L'augmentation en début d'inversac des teneurs en ^{222}Rn dans les ouvrages F4 et F6 (et légèrement à Cauvy) liée à des augmentations de la conductivité, peut être associée à un apport plus important d'eau provenant de l'interface Jurassique-Miocène dans ces ouvrages. L'évolution chimique spécifique mise en évidence dans S12 (4.1.4 et Figure 25) ne semble pas affecter les teneurs en ^{222}Rn .

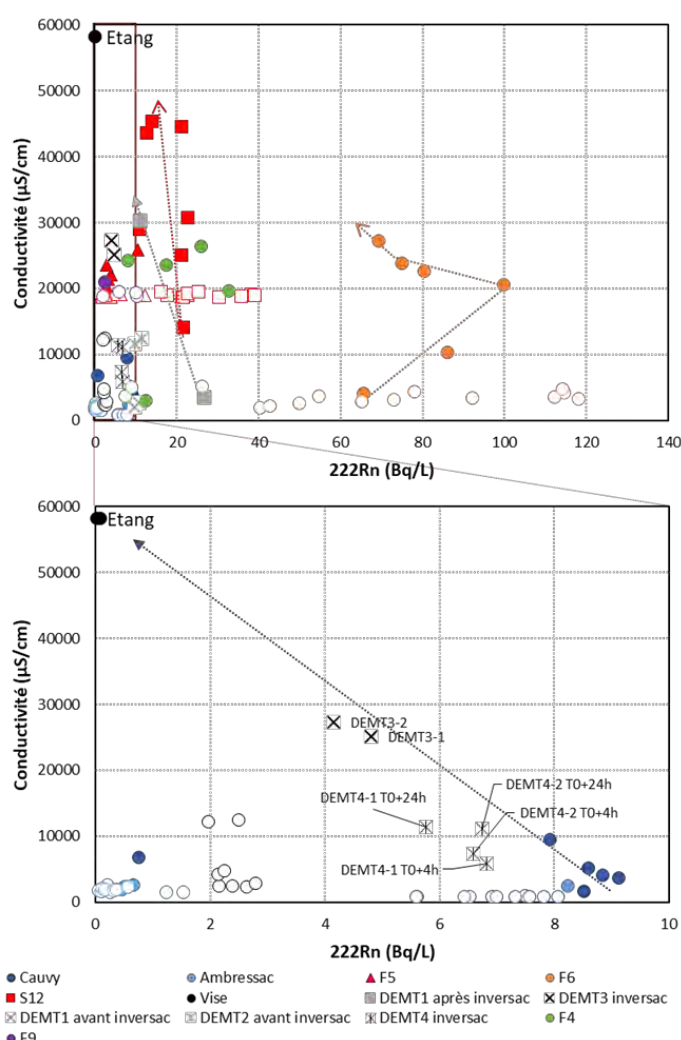


Figure A4.1: Conductivité en fonction du ^{222}Rn des eaux du bassin de Thau sur la période 2018-2021. Les figurés vides correspondent aux campagnes spatiales et mensuelles i.e. en conditions normal (2018-2020) et les figurés pleins aux campagnes liés à l'inversac (2020-2021). Les droites

représente les évolutions des différents points de prélèvement entre les conditions normal et durant l'inversac.

Les teneurs en ^{222}Rn des eaux de la Vise et des forages DEMENT1, DEMENT3 et DEMENT4 en période d'inversac sont illustrées sur la Figure A4.1.

Les eaux de la lagune ont des teneurs très faible en ^{222}Rn proches des limites de détections (inférieur à 0,09 Bq/L).

Dans le forage DEMENT1, l'inversac provoque un enrichissement en ^{222}Rn dans les premiers jours passant de 10,90 Bq/L avant l'inversac à 26,74 Bq/L le 4 décembre. Ceci nous indique que dans un premier temps de l'inversac, DEMENT1 est alimenté par des eaux de type F6, ayant eu un contact avec minéraux argileux du Miocène et en particulier au niveau de l'interface Jurassique-Miocène. Dans un second temps (dès janvier 2021), les teneurs en ^{222}Rn des eaux de DEMENT1 reviennent à des valeurs représentatives des eaux karstiques (10,97 Bq/L) toutefois supérieurs aux eaux de la lagune. Nous avons proposé précédemment que les valeurs en ^{222}Rn mesurées dans les eaux karstiques proviennent de sa production dans les sols, les sédiments résiduels dans les cavités karstiques peu profondes et/ou les (hydr)oxydes de Mn-Fe enrichis en uranium, thorium ou radium dans les fractures (Condomines et al., 2012). Ainsi cela signifie dans le cas de DEMENT1 que soit les eaux de la lagune se sont enrichie dus à des interactions eau-roche spécifiques dans les cavités karstiques avant d'alimenter le DEMENT1, soit les eaux alimentant l'ouvrage sont un mélange entre les eaux de la lagune et des eaux ayant les mêmes caractéristiques que les eaux karstiques, apportant leur signature en radon.

Enfin, DEMENT3 et DEMENT4 ont des teneurs du même ordre de grandeurs que celles des eaux karstiques de la presqu'île, comprises entre 4,15 et 6,82 Bq/L. Le radon 222 ayant des temps de demi-vie faible (3,823 jours) cela signifie que les eaux alimentant ces ouvrages ont récemment été en contact avec des sédiments résiduels et/ou des (hydr)oxydes de Mn-Fe enrichis en uranium, thorium ou radium via probablement une circulation rapide dans des cavités karstiques.

A4.2 : Nouveaux résultats en REE en périodes d'inversac sur les forages DENT1 et DENT2

Les résultats des teneurs en REE des campagnes en période d'inversac sont normalisés au NASC (voir le rapport BRGM/RP-71281-FR pour plus d'informations) et représenté dans la Figure A4.2. Les nouveaux profils (en couleurs sur la Figure A4.2) sont comparés aux campagnes précédentes (en gris) afin de mieux visualiser l'impact de l'inversac sur ces ouvrages

Les profils REE/NASC d'Ambressac en période d'inversac varient dans le même ordre de grandeur que lors des campagnes mensuelles. L'inversac ne semble donc pas influencer les REE de cette source. On retrouve sur ces profils l'anomalie en Gd déjà mise en évidence auparavant indiquant que les eaux portant cette contamination, provenant d'effluents d'eaux usées, alimentent toujours Ambressac durant l'inversac.

Les profils de Cauvy ont généralement des valeurs REE/NASC supérieures aux campagnes mensuelles, se rapprochant du profil de la lagune de Thau (données Aquilina et al., 2002) confirmant l'impact important d'eaux marines de type lagune dans l'ouvrage. Le profil du 3 décembre se démarque des autres par une anomalie en Ce moins marquée, suggérant un impact d'une eau de type thermal. Ces résultats associés aux teneurs en ^{222}Rn peuvent suggérer un apport d'eau provenant de la couverture Miocène.

Les profils REE des ouvrages F4, F5, F6 et S12 en période d'inversac sont très variables en comparaison à leur profil en période normale, mettant en évidence une modification chimique des flux alimentant ces ouvrages. Les profils REE/NASC des forages F5 et S12 semblent diminuer en période d'inversac, se rapprochant du profil de la lagune de Thau (données Aquilina et al., 2002). Ceci confirme l'impact d'un mélange avec les eaux marines de type lagune.

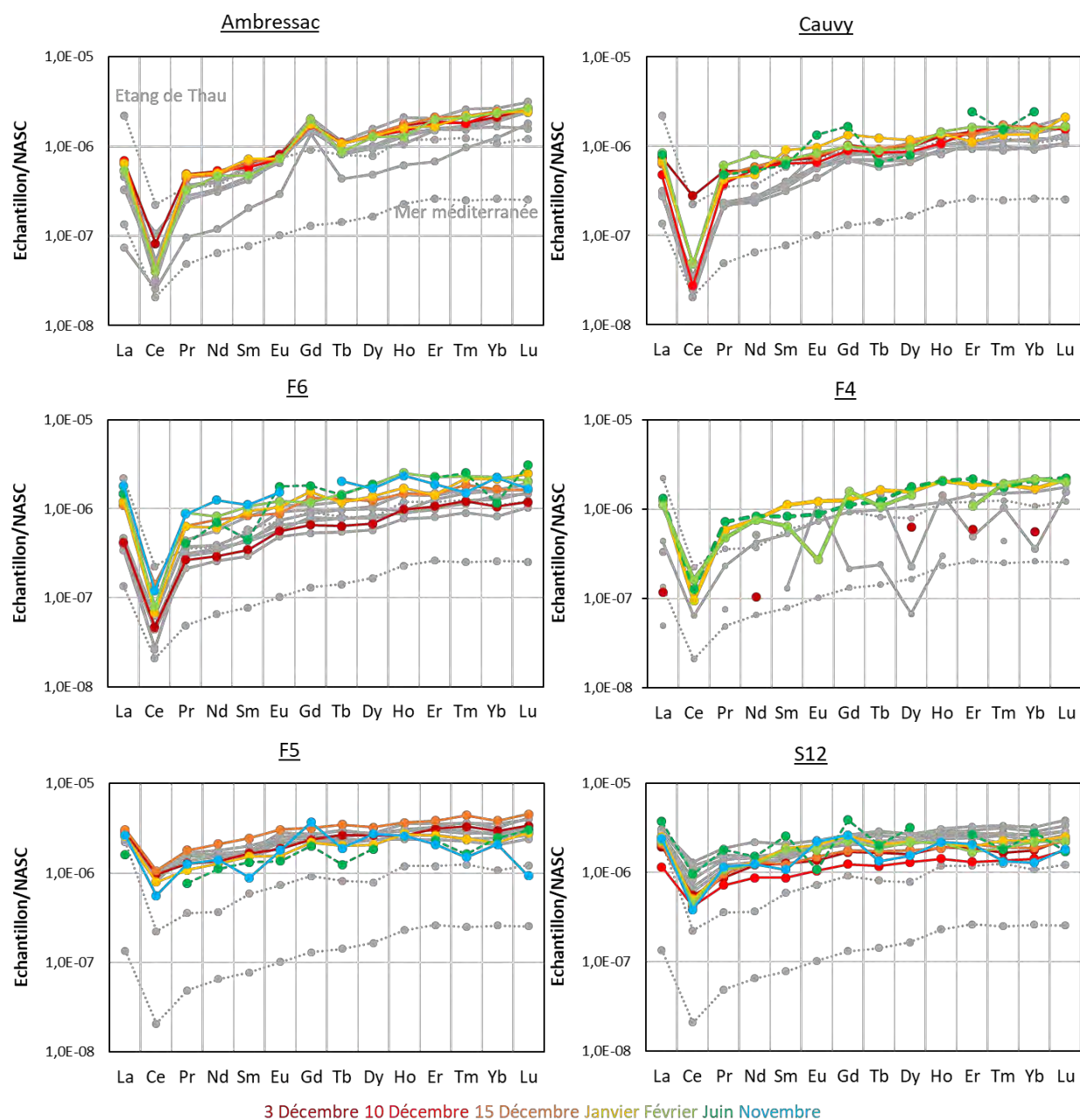
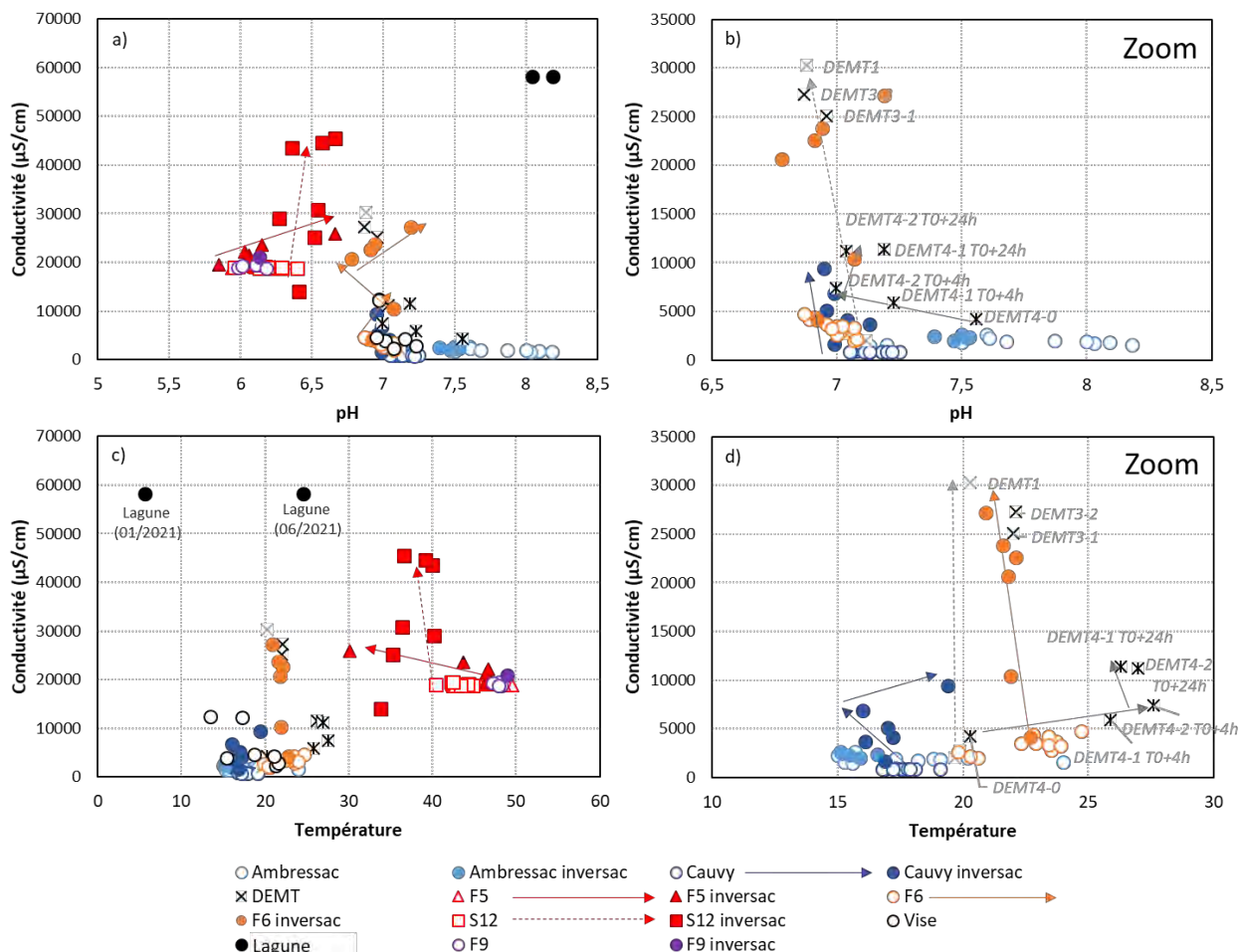


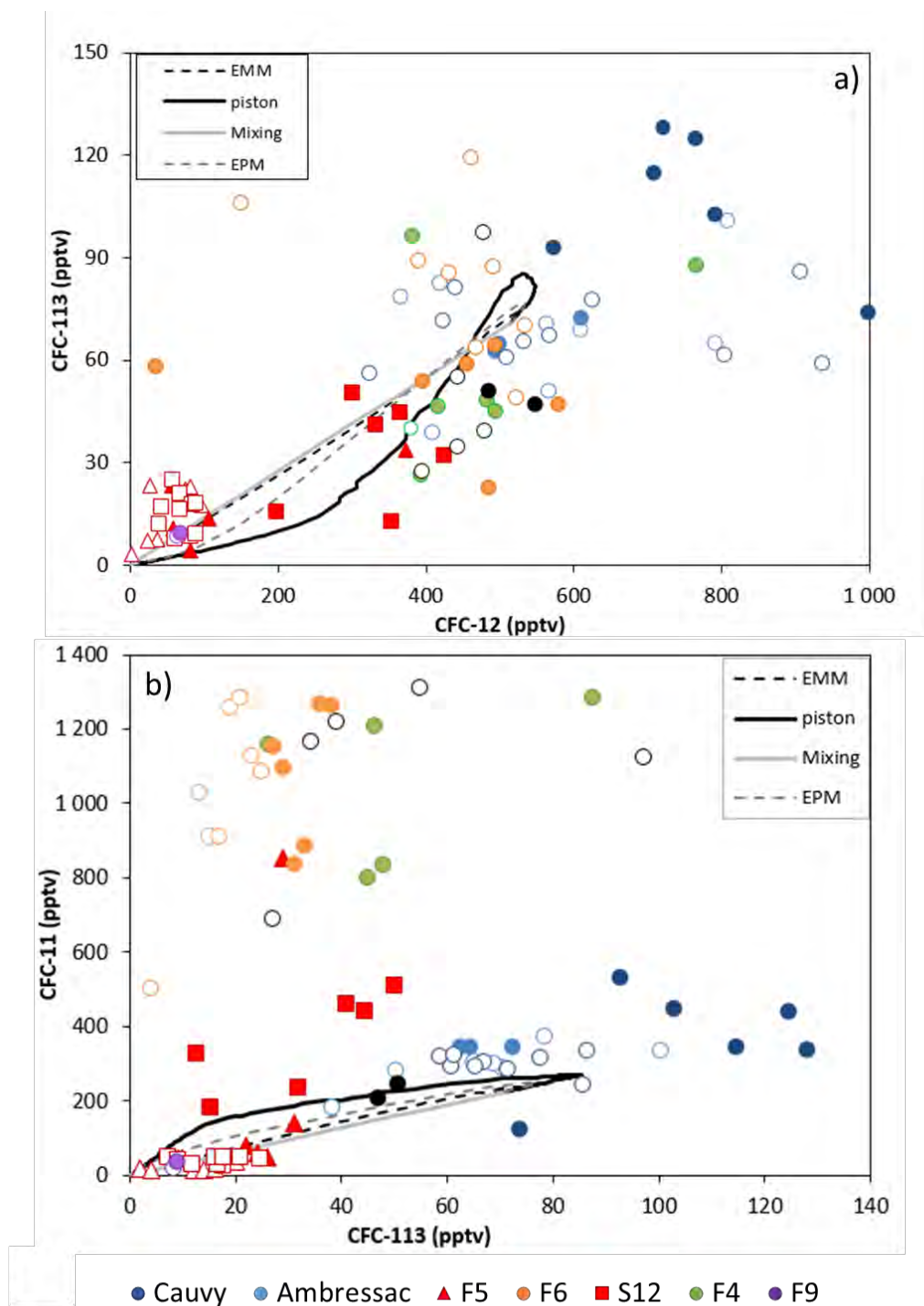
Figure A4.2: Profils des terres rares (normalisés avec le NASC) des eaux échantillonnées lors de l'inversac. Les profils des campagnes mensuelles sont représentées en gris (traits plein).

Les données des REE des ouvrages DENT3 et DENT4 et de la lagune sont proches, voir inférieurs, aux limites de quantifications. Il n'est donc pas possible d'interpréter les tendances de ces éléments.

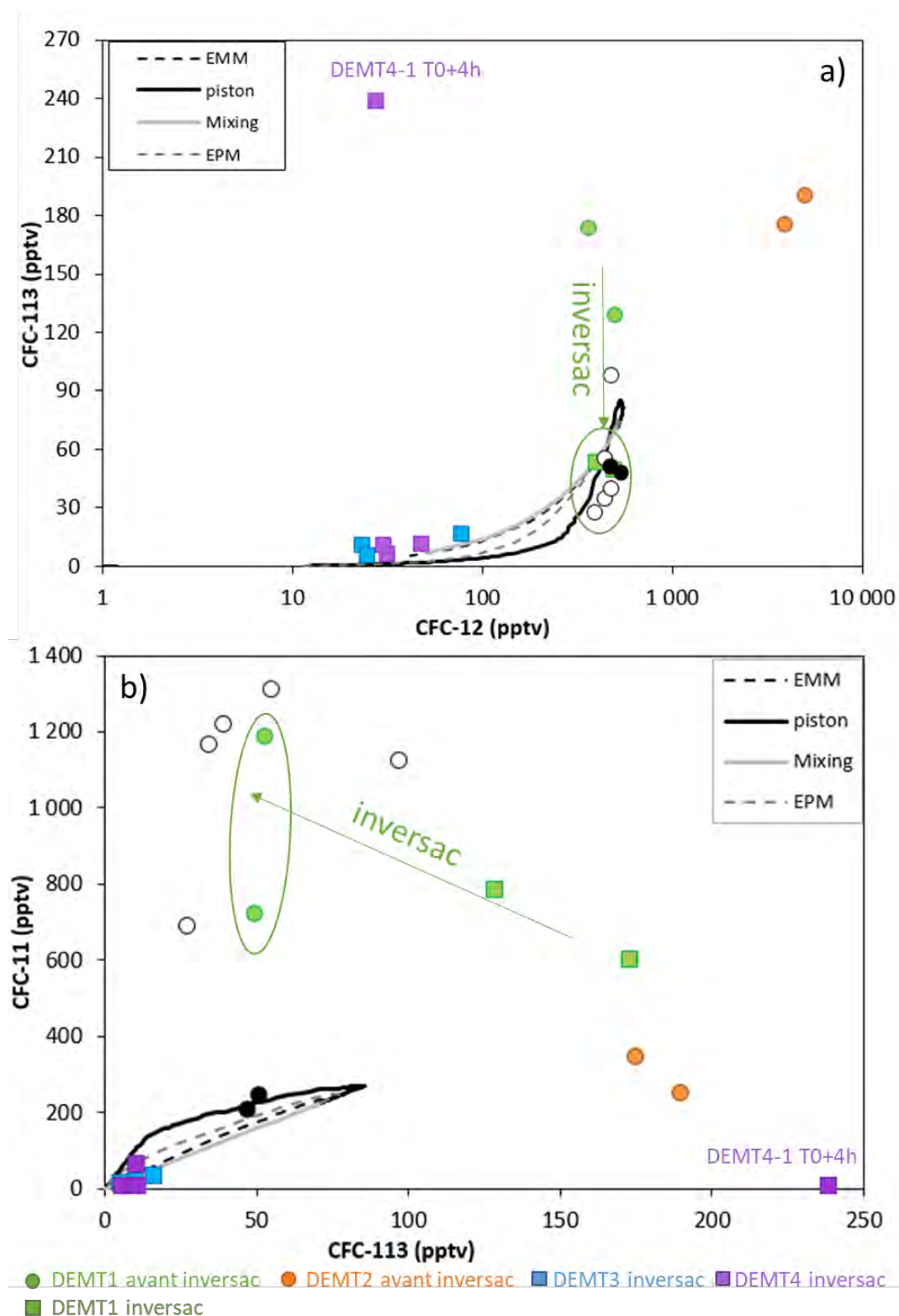
A4.3 : Données de la conductivité électrique spécifique de l'eau en fonction du pH (a et b) et de la température (c et d) des eaux étudiées (2018-2021). Les figurés vides correspondent aux campagnes spatiales et mensuelles i.e. en conditions normal (2018-2020) et les figurés pleins aux campagnes liés à l'inversac (2020-2021). Les droites représentent les évolutions des différents points de prélèvement entre les conditions normales et durant l'inversac.



A4.4 : Représentation graphique des résultats de CFC-113 vs CFC-12 (a) et CFC-11 vs CFC-113 (b) en pptv des eaux étudiées entre 2018 et 2021. Les figurés vides correspondent aux données avant inversac (2018-2020) et les figurés pleins aux campagnes en période d'inversac (2020-2021).



A4.5 : Représentation graphique des résultats de CFC-113 vs CFC-12 (a) et CFC-11 vs CFC-113 (b) en pptv des forages de la plateforme expérimentale.





Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale Occitanie

1039 rue de Pinville

34000 – Montpellier – France

Tél. : 04 67 15 79 90